

Mach, Ernst
Grundlinien der
Lehre von den
Bewegungsempfindungen

GRUNDLINIEN

DER

LEHRE VON DEN

BEWEGUNGSEMPFINDUNGEN

VON

DR. E. MACH,

PROFESSOR DER PHYSIK AN DER UNIVERSITÄT PRAG.

MIT 18 HOLZSCHNITTEN.

LEIPZIG,

VERLAG VON WILHELM ENGELMANN.

1875.

Vorwort.

Vorliegende Schrift versucht zum erstenmal die vollständigere Darstellung eines Capitels der Physiologie, zu dem unstreitig Purkinje (Purkyně), Flourens und Goltz den ersten Grund gelegt haben. Sowohl bei meinen Versuchen wie bei meiner Darstellung habe ich ein besonderes Gewicht auf die physikalische Seite der Sache gelegt, was sich leicht rechtfertigen lässt. Nicht nur hat diese Seite als der meist entwickelten Naturwissenschaft angehörig Anspruch darauf, zuerst erledigt zu werden, nicht nur lag sie mir fachlich näher wie jede andere, sondern sie war auch die bisher am wenigsten bearbeitete.

Dass die Untersuchung der mechanischen Vorgänge, durch welche die Bewegungsempfindungen erregt werden, nicht mehr lange hätte ausbleiben können, zeigen die bald nach meiner ersten Mittheilung über diesen Gegenstand erschienenen Arbeiten von Breuer und Brown, der andern zahlreichen Abhandlungen verwandten Inhaltes gar nicht zu gedenken.

Man wird, wie ich hoffe, finden, dass die Ergebnisse meiner Arbeit ihren Werth behalten, auch wenn man sich

nicht der am Schlusse entwickelten Hypothese über das Organ der Bewegungsempfindungen anschliesst. Angesichts der vielen Thatsachen aber, welche alle zu dieser Hypothese drängen, habe ich, ungeachtet der von Boettcher vorgebrachten Einwendungen, geglaubt, dieselbe aufrecht halten zu müssen.

Prag, August 1874.

D. V.

Einleitung.

1.

Die characteristischen Empfindungen, welche die activen oder passiven Bewegungen unseres Körpers begleiten und die wir verwenden um den Sinn und das Ausmaass dieser Bewegungen zu erkennen, entgehen auch der oberflächlichen Beobachtung nicht. Wir wissen in der Cajüte des Schiffes eingeschlossen ohne Hilfe unseres Gesichtssinnes die Schwankungen des Schiffes, die Drehungen, so wie auch die beginnenden Progressivbewegungen fast so gut zu beurtheilen als ob es unsere eigenen willkührlichen Bewegungen wären, die wir hier gezwungen, passiv ausführen. So leicht nun auch die erwähnten Empfindungen der Beobachtung zugänglich sind, beziehn sich doch nur sehr wenige vereinzelte und unvollständige Versuche auf die Ermittlung der hieher gehörigen Thatsachen und ihrer Gesetze. Die Quellen dieser Bewegungsempfindungen aufzusuchen und ihre Abhängigkeit von den Bewegungen des Körpers zu finden, ist die Aufgabe dieser Schrift.

2.

Der ältere Darwin und Purkyně haben die sonderbaren subjectiven Bewegungserscheinungen studirt, welche auftreten, wenn man sich einigemal rasch umdreht und dann plötzlich stehn bleibt. Sie haben auch einige Regeln dieser Drehschwindelphänomene festgestellt. Natürlich haben auch hier die ungewöhnlichen, zu Täuschungen Anlass gebenden Erscheinungen zuerst die Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Purkyně hat bei dieser Gelegenheit auch, einen Versuch Ritters wiederholend, ähnliche Schwindelerscheinungen mit Hilfe des galvanischen Stroms hervorgebracht.

Versuche von scheinbar ganz anderer Art, die aber wahrscheinlich mit den erwähnten im engsten Zusammenhange stehn, sind von Flourens angestellt worden. Es sind dies die berühmten Versuche mit der Durchschneidung der Bogengänge des Ohrlabyrinthes an Thieren, welche höchst eigenthümliche Drehbewegungen der operirten Thiere zur Folge haben.

3.

Ich selbst bin zum Nachdenken über die Bewegungsempfindungen bei Gelegenheit einer Versuchsreihe über Flüssigkeiten, welche suspendirte Körperchen enthalten, angeregt worden, die einer meiner Schüler auf meinen Vorschlag ausgeführt hat*). Die von dem Beschleunigungszustand der aufgelegten Körper abhängige Belastung der Wage, die bei diesen Versuchen auftritt, legt den Gedanken nahe, dass ähnliche Verhältnisse bei Bewegung unseres Körpers bestehn und dass jeder Körpertheil den andern als veränderliche von der Bewegung abhängige Last empfinden kann. Nach meiner damaligen Anschauung liefert der ganze Körper Beiträge zu den Bewegungsempfindungen. Die Annahme eines besondern Organs der Bewegungsempfindungen blieb mir damals fern.

Die Auffassung der Flourens'schen Versuche hat, nachdem dieselben von sehr verschiedenen Forschern wiederholt worden waren, durch Goltz eine neue Wendung genommen. Obgleich Flourens bei Beschreibung der Erscheinungen immer von Schwindel und Gleichgewichtsstörung spricht, hat er die Halbcirkelcanäle nie als Gleichgewichtsorgan betrachtet. Das Labyrinth ist ihm durchaus Gehörorgan und die Folge des Eingriffes eine schmerzhafte Gehörsstörung. Nach Goltz aber sind die Halbcirkelcanäle ein Gleichgewichtsorgan für die Kopfstellung.

Ein Zufall führte mich auf das Studium der Bewegungsempfindungen zurück. Ich beobachtete die Schiefstellung der Häuser und Bäume beim Durchfahren einer Eisenbahncurve. Sie liess sich leicht erklären, wenn man eine directe Empfindung der resultirenden

*) C. Bondy, über den Auftrieb in Flüssigkeiten, welche specifisch schwerere oder leichtere Körperchen suspendirt enthalten. Sitzgsber. d. Wien. Akademie. Bd. 51. — Mach, über Flüssigkeiten, welche suspendirte Körperchen enthalten. Pogg. Ann. Bd. 126. S. 327.

Massenbeschleunigung annahm. Obwohl mir die physiologische Seite des Gegenstandes, auch als ich wieder auf denselben verfiel, noch ganz fremd war und ich die Arbeiten von Flourens und Goltz kaum dem Namen nach kannte, so war diese Spur Ferment doch genügend, um meine Gedanken in der Richtung anzuregen, welche sie wirklich eingeschlagen haben. Durch physiologisch-optische Studien waren mir einstweilen die »unbewussten Schlüsse« und damit die psychologische Zusammensetzung einer Bewegungswahrnehmung aus sehr verschiedenen Elementen sehr unangenehm geworden und das Gleichgewichtsorgan wurde als ein willkommenes Auskunftsmittel begrüsst.

4.

Die Anschauung die ich gewonnen habe, und welche mir die sämmtlichen bisher bekannten Thatsachen in natürlichen und übersichtlichen Zusammenhang zu bringen scheint, ist nun die, dass gewisse Labyrinthnerven vermöge ihrer specifischen Energie jeden Reiz mit einer Bewegungsempfindung beantworten, wodurch sich die Flourens'schen Erscheinungen erklären. Dieser Reiz wird aber in der Regel durch den Labyrinthinhalt selbst gesetzt, welcher bei Bewegungen der Thiere das Schwerpunkt- und Flächenprincip zu erfüllen strebt. Auf diese Weise erhalten die Thiere Bewegungsempfindungen, gleichgültig ob sie sich activ bewegen, oder passiv bewegt werden.

Dass diese Anschauung einladend ist und auch Andere anziehen kann, beweist der Umstand, dass sie in wenig abweichender Form unmittelbar nach meiner ersten Publication noch zweimal selbstständig von Andern entwickelt worden ist, einmal von Breuer und später von Brown.

5.

Die Thatsachen, welche zu meiner Anschauung führen und zur Begründung derselben ausreichen, sind sämmtlich seit 1824, also seit einem halben Jahrhundert bekannt. Wenn diese Anschauung bisher noch nicht aufgetreten ist, so beweist dies, dass auch einfache physikalische Betrachtungen den Physiologen nicht immer nahe genug liegen, und hieraus schöpfte ich eben die Berechtigung als

Physiker ein Wort in dieser Angelegenheit mitzureden. Mögen immerhin die Physiologen nicht mit allen Theilen meiner Arbeit einverstanden sein, die Bearbeitung der physikalischen Seite des Gegenstandes wird nicht ganz ihren Werth verlieren.

Meine Theorie ganz als Einfall behandeln und sie unterdrücken wollte ich nicht, weil sie zu reich an Folgerungen war. Mich auf eine blosse Notiz beschränken, wäre sehr bequem gewesen, hätte jedoch zu freibeuterisch erscheinen können. So entschloss ich mich eine besondere Untersuchung anzustellen, um mehr wie ein blosses Aperçu bieten zu können.

Im Laufe dieser Untersuchung hat das Gleichgewichtsorgan für mich sehr an Wahrscheinlichkeit gewonnen. Ob diese Wahrscheinlichkeit durch meine Bemühungen auch für die Wissenschaft gewachsen ist, möge der Leser aus den folgenden Blättern entnehmen, welche die Begründung meiner Anschauung enthalten, in der ich keine Lücke verdecken, keine Schwäche verhüllen will. Der Wunsch, diesen Gegenstand rasch seinem definitiven Abschluss zuzuführen, dürfte ohnehin nur einen illusorischen Erfolg haben. Ich bin zufrieden, wenn ich das Capitel gefördert habe.

Immer ist es mir wünschenswerth, dass die Versuche wiederholt werden. Ich füge desshalb bei, dass die Kosten aller Versuche und Apparate (in einfacher Ausführung) 100 Thaler nicht überstiegen haben. Hiebei ist noch zu bedenken, dass die Wiederholung von Versuchen immer weniger kostspielig ist, weil alle Umänderungen der Apparate, welche bei der ersten Ausführung unvermeidlich sind, wegfallen.

6.

Es möge gleich hier eine Zusammenstellung der mir bekannten hieher gehörigen Literatur folgen:

*Marcus Herz, über den Schwindel. Berlin. 1791.

Darwin, Zoonomia (übers. v. Girtanner).

Fr. u. P. Gruithuisen, Anthropologie. München. 1810.

Ritter in Hufelands Journal für prakt. Heilkunde. Band XVII.

*Purkyně, Beiträge zur näheren Kenntniss des Schwindels. Medicin. Jahrbücher des österreich. Staates. VI. Bd. II. St. S. 79. Wien 1820.

—— Physiologische Versuche über den Schwindel. 10. Bulletin d. naturwiss. Section der schlesischen Gesellschaft. S. 35. Breslau 1825.

Purkyně, Ueber die physiologische Bedeutung des Schwindels. 12. Bulletin etc. 1826. S. 1.

*Flourens, recherches experimentales sur les propriétés et les fonctions du système nerveux. 2me édition. Paris 1842. S. 438.

Harless, Wagners Handwörterbuch d. Physiologie. Bd. IV. S. 422.

Czermak, Comptes rendus. 1860. T. LI. S. 821.

Brown-Sequard, Course of lectures on the physiology and pathology of the central nervous system. Philadelphia 1860. S. 194.

Vulpian, leçons sur la physiologie générale et comparée du système nerveux. Paris 1866 S. 600.

*Schiff, Lehrbuch d. Physiologie. Lahr 1858—1859. S. 399.

*Löwenberg, über die nach Durchschneidung d. Bogengänge d. Ohrlabyrinthes auftretenden Bewegungsstörungen. Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde von Knapp u. Moos. Bd. III.

*Goltz, über die physiol. Bedeutung der Bogengänge des Ohrlabyrinthes. Pflügers Archiv. Bd. III S. 172.

*Mach, über Flüssigkeiten, welche suspendirte Körperchen enthalten. Pogg. Ann. Bd. 126. S. 327 (1865).

Schklarewsky, Göttinger Nachrichten. 1872. No. 15.

*Hitzig, Archiv von Reichert und Dubois. 1871.

*Mach, Physikalische Versuche über den Gleichgewichtssinn d. Menschen. Sitzgsber. d. Wiener Akademie. Bd. 68. 6. Nov. 1873.

*Breuer, Anzeiger d. k. k. Gesellschaft d. Aerzte. No. 7 (1873). Sitzung v. 14. Nov. 1873.

*—— Jahrbuch d. Gesellschaft d. Aerzte. 1. Heft. 1874.

*Mach, Versuche über den Gleichgewichtssinn. Sitzgsber. d. Wiener Akademie. 2. Mittheilung. Bd. 69. 1874.

*—— dritte Mittheilung. Bd. 69. 1874.

*Curschmann, über das Verhältniss der Halbcirkelcanäle des Ohrlabyrinthes zum Körpergleichgewicht. Deutsche Klinik No. 3. 1874.

*Wundt, physiologische Psychologie. S. 208. 1873.

*Cyon, Pflügers Archiv. VIII. Bd. Heft 6, 7. S. 306.

*Böttcher, über die Durchschneidung d. Bogengänge d. Gehörlabyrinthes. Archiv für Ohrenheilkunde von Tröltsch. Bd. 9. S. 1.

—— Dorpater medicinische Zeitschr. 1872.

*Berthold, über die Function d. Bogengänge des Ohrlabyrinthes. Archiv für Ohrenheilkunde von Tröltsch. Bd. 9. S. 77.

*A. Crum Brown, on the sense of rotation. Journal of Anatomy and Physiology. Vol. VIII.

*Sigm. Exner, Anzeiger d. Wiener Akademie. 1874. No. 20.

Die mit Sternchen bezeichneten Abhandlungen liegen mir bei dieser Arbeit im Original vor, die übrigen kenne ich bloss aus Citaten und Auszügen.

Die mechanischen Grundsätze.

1.

Die Bewegung unseres Körpers ist stets ein mechanischer Vorgang. Gibt es besondere Bewegungsempfindungen, so liegt die letzte Wurzel derselben jedenfalls auch in mechanischen Vorgängen. Wir müssen uns also zunächst die mechanischen Grundsätze in Erinnerung bringen, welche wir beim Studium dieser Erscheinungen anzuwenden haben. Wir wollen uns dieselben durch mehrere anschauliche Beispiele erläutern, damit sie auch demjenigen, der an mathematische Betrachtungen nicht gewöhnt ist, geläufig werden.

Die Galilei-Newton'sche Zeit hat die Einsicht gewonnen, dass die Geschwindigkeitsänderung (Beschleunigung) eines Körpers stets durch die Geschwindigkeitsänderung eines andern Körpers bedingt ist. Aus der Beobachtung eines solchen Falles gegenseitiger Geschwindigkeitsänderung zweier Körper A, B lässt sich ein bewegungsbestimmendes Merkmal, das Massenverhältniss ableiten, welches für alle andern Beziehungen dieser zwei Körper maassgebend ist. Erhält A in der Zeiteinheit die Beschleunigung φ, B aber φ', so ist $\frac{\varphi}{\varphi'}$ das Massenverhältniss von B zu A, oder wenn man berücksichtigt, dass die Körper sich Beschleunigungen von entgegengesetztem Sinn nach der Richtung ihrer Verbindungslinie ertheilen $-\frac{\varphi}{\varphi'}$. Die Massenverhältnisse einer Reihe von Körpern zu demselben Körper A, sind, wenn A als Masseneinheit angenommen wird, die Massen dieser Körper*). Aus dieser Definition ersieht man, dass für die Massen m, m', welche sich die Beschleunigungen φ, φ' ertheilen, mit Rücksicht auf die Zeichen, die Gleichung besteht

$$m\varphi + m'\varphi' = 0.$$

Das Product $m\varphi$ kann keine Aenderung erfahren, ohne dass das andere dem Zeichen nach entgegengesetzte Product dieselbe Aenderung erfährt. Diese Producte $m\varphi$, $m\varphi'$ haben also einen ökono-

*) Mach, die Geschichte und die Wurzel des Satzes der Erhaltung der Arbeit. Prag, Calve 1872. S. 50.

mischen Werth für die mechanische Betrachtung. Sie heissen nach dem allgemeinen Gebrauch Kräfte. Die Kräfte, welche zwei Körper auf einander ausüben, sind gleich und entgegengesetzt. Man kann auch allgemeiner sagen, die Summe aller Kräfte in einem System von Massen ist $= 0$.

Ist unser eigener Körper in Wechselwirkung mit einer Masse m, so empfinden wir einen von der Grösse des Productes $m\varphi$ abhängigen Druck. Man hat daher auch für $m\varphi$ selbst den Ausdruck Druck gebraucht. Man spricht demnach von Gleichheit des Druckes und Gegendruckes bei der Wechselwirkung zweier Körper. Ueberall, wo einer Masse m eine Geschwindigkeitsveränderung φ ertheilt wird, muss ein Druck $m\varphi$ vorhanden gewesen sein, den demnach auch noch ein anderer Körper als Gegendruck erlitten haben muss.

2.

Unter gleichen Gravitationsumständen (z. B. an demselben Orte der Erde) sind Massen und Gewichte der Körper einander proportional. Desshalb kann man für gewöhnlich den Schwerpunkt und den Mittelpunkt der Masse eines Körpersystems für identisch halten. Für den Schwerpunkt eines Körpersystems ergibt sich aber dem Obigen gemäss ein wichtiger Satz, welcher schon von Newton aufgestellt worden ist, der Satz der Erhaltung des Schwerpunktes.

Der Schwerpunkt zweier Massen theilt die Verbindungslinie derselben in Abschnitte, welche sich umgekehrt wie die anliegenden Massen verhalten. Ertheilen sich nun die Massen Beschleunigungen nach der Richtung ihrer Verbindungslinie, welche sich verkehrt wie sie selbst verhalten, so vermögen sie durch ihre gegenseitige Einwirkung diesen Schwerpunkt nicht zu verschieben.

Besteht ein System aus mehreren Massen, welche nicht nur (durch innere Kräfte) sich Beschleunigungen ertheilen, sondern auch von nicht zum System gehörigen Körpern (von äusseren Kräften) afficirt werden, so lässt sich leicht zeigen, dass die inneren Kräfte auf die Bewegung des Schwerpunktes des Systems keinen Einfluss haben. In der That, wenn irgend eine Masse m des Systems durch eine innere Kraft eine Verschiebung x nach einer bestimmten Rich-

tung erfährt, so wird der Schwerpunkt des Systems um $\frac{mx}{M}$, wobei M die Masse des Systems, nach derselben Richtung verschoben. Diese Verschiebung von m hat aber zur Voraussetzung, dass eine andere Masse des Systems m' um $-x'$ sich verschoben hat, was also dem Schwerpunkt die Verschiebung $-\frac{m'x'}{M}$ ertheilt. Weil nun nach dem Obigen $mx - m'x' = 0$, so ist auch die totale Schwerpunktverschiebung $\frac{mx}{M} - \frac{m'x'}{M} = 0$. Dies gilt für je zwei Massen des Systems und für jede Richtung. Die Bewegung des Schwerpunktes ist also bloss durch die äussern Kräfte bestimmt. Darin besteht eben der Satz der Erhaltung des Schwerpunktes.

Ein anderer allgemeiner Satz, der für ein freies Massensystem gilt, ist der Satz der Erhaltung der Flächen. Derselbe ist von D'Arcy und Euler gefunden worden. Betrachten wir zwei in Wechselwirkung stehende Massen m, m'. Dieselben legen vermöge ihrer Wechselwirkung allein die Wege AB, CD (Fig. 1) nach der Richtung der Verbindungslinie zurück. Nimmt man auf das Zeichen dieser Bewegungen Rücksicht, so ist dem Obigen gemäss

$$m \cdot AB + m' \cdot CD = 0$$

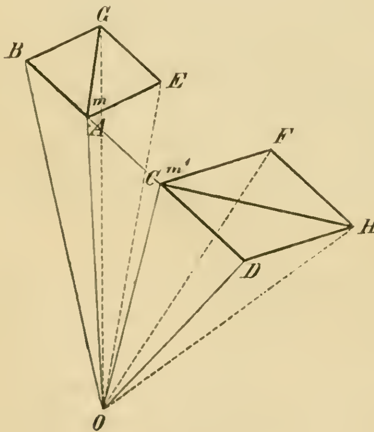


Fig. 1.

Zieht man von irgend einem Punkte O aus zu den bewegten Massen Radienvectoren und betrachtet die in entgegengesetztem Sinne von denselben durchstrichenen Flächenräume als von entgegengesetztem Zeichen, so ist auch $m \cdot OAB + m' \cdot OCD = 0$.

Wenn zwei Massen in Wechselwirkung stehn und man zieht von irgend einem Punkte aus zu denselben Radienvectoren, so ist die Summe der von denselben durchstrichenen Flächenräume multiplicirt mit den zugehörigen Massen $= 0$.

Wären die Massen von äussern Kräften afficirt und würden vermöge dieser die Flächenräume OAE und OCF beschrieben, so gibt die Zusammenwirkung beider Kräfte während einer sehr kleinen Zeit) die Flächenräume OAG und OCH. Nun lässt sich aber mit Hilfe des Varignon'schen Satzes vom Kräfteparallelogramm leicht nachweisen, dass

$$\begin{aligned} m \cdot OAG + m' \cdot OCH &= m \cdot OAE + m' \cdot OCF + m \cdot OAB + m' \cdot OCD \\ &= m \cdot OAE + m' \cdot OCF \end{aligned}$$

d. h. die Summe der durchstrichenen Flächenräume wird durch die innern Kräfte nicht geändert.

Sind mehrere Massen vorhanden, so kann man von der Projection des ganzen Bewegungsvorganges auf eine gegebene Ebene für je zwei Massen dasselbe behaupten.

Zieht man von einem Punkte aus nach den Massen eines Systems Radienvectoren, und projicirt die durchstrichenen Flächenräume auf eine gegebene Ebene, so ist die Summe dieser mit den zugehörigen Massen multiplicirten Flächenräume bloss durch die äusseren Kräfte bestimmt. Dies ist das Princip der Erhaltung der Flächen.

3.

Der Vollständigkeit wegen mag hier auch die analytische Entwicklung beider Sätze Platz finden, wie sie seit Lagrange gebräuchlich ist. Ein freies System, bestehend aus den Massen m, m', $m'' \cdots$, auf welche die Kräfte X, Y, Z, X', Y', $Z' \cdots$ wirken, befolgt das D'Alembert'sche Princip

$$\Sigma\left[\left(X - m\frac{d^2x}{dt^2}\right)\delta x + \left(Y - m\frac{d^2y}{dt^2}\right)\delta y + \left(Z - m\frac{d^2z}{dt^2}\right)\delta z\right] = 0$$

d. h. die Kräfte $\left(X - m\frac{d^2x}{dt^2}\right)$, $\left(Y - m\frac{d^2y}{dt^2}\right)$, $\left(Z - m\frac{d^2z}{dt^2}\right) \cdots$ halten sich an diesem System das Gleichgewicht. Wie nun Stevin zuerst bemerkt hat, wird ein Gleichgewicht nicht gestört, wenn man in dem System neue feste Verbindungen anbringt. Das Gleichgewicht wird also fortbestehn, wenn wir uns das ganze freie System fest denken. Es werden also die obigen Kräfte die Gleichgewichtsbedingungen eines festen Körpers erfüllen müssen. Demnach haben wir

$$\Sigma\left(X-m\frac{d^2x}{dt^2}\right) = 0$$
$$\Sigma\left(Y-m\frac{d^2y}{dt^2}\right) = 0$$
$$\Sigma\left(Z-m\frac{d^2z}{dt^2}\right) = 0$$
$$\Sigma\left(X-m\frac{d^2x}{dt^2}\right)y-\left(Y-m\frac{d^2y}{dt^2}\right)x = 0$$
$$\Sigma\left(Y-m\frac{d^2y}{dt^2}\right)z-\left(Z-m\frac{d^2z}{dt^2}\right)y = 0$$
$$\Sigma\left(Z-m\frac{d^2z}{dt^2}\right)x-\left(X-m\frac{d^2x}{dt^2}\right)z = 0$$

Von diesen sechs Gleichungen liefern die drei ersten das Schwerpunkts-, die drei andern das Flächenprincip. Nennt man M die Gesammtmasse des Systems und bedenkt, dass $\frac{\Sigma mx}{M} = \xi$, $\frac{\Sigma my}{M} = \eta$, $\frac{\Sigma mz}{M} = \zeta$ die Coordinaten des Schwerpunktes vorstellen, so bringt man die drei ersten Gleichungen leicht auf die Form

$$\Sigma X = M\frac{d^2\xi}{dt^2}$$
$$\Sigma Y = M\frac{d^2\eta}{dt^2}$$
$$\Sigma Z = M\frac{d^2\zeta}{dt^2}$$

Aus dieser Form ersieht man, dass die Bewegung des Schwerpunktes dieselbe ist, wie wenn alle Massen und Kräfte in demselben vereinigt wären. Da nun die innern Kräfte paarweise gleich und entgegengesetzt sind, haben sie auf diese Bewegung keinen Einfluss.

Die drei letzten Gleichungen lassen sich in folgender Weise behandeln. Die erste dieser Gleichungen gibt

$$\Sigma\,(Xy-Yx) = \Sigma m\left(y\frac{d^2x}{dt^2}-x\frac{d^2y}{dt^2}\right) = \frac{d}{dt}\,\Sigma m\left(y\frac{dx}{dt}-x\frac{dy}{dt}\right)$$

Denken wir uns vom Anfangspunkte der Coordinaten zu den Massen Radienvectoren gezogen, projiciren die von denselben beschriebenen Flächenräume auf die XY Ebene und bezeichnen sie mit α, so stellt der Ausdruck $\Sigma m\left(y\frac{dx}{dt}-x\frac{dy}{dt}\right)$ die Summe $2\Sigma m\frac{d\alpha}{dt}$, demnach der ganze Ausdruck rechter Hand die Summe $2\Sigma m\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ vor. Der Ausdruck $\Sigma(Xy-Yx)$ ist das Drehungsmoment des ganzen Systems in Bezug auf die X Axe, welches wir $\mathfrak{A}$ nennen wollen. Die

drei Gleichungen, welche sich alle in derselben Weise behandeln lassen, nehmen nun die Form an

$$2\Sigma m \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \mathfrak{A}$$

$$2\Sigma m \frac{d^2\beta}{dt^2} = \mathfrak{B}$$

$$2\Sigma m \frac{d^2\gamma}{dt^2} = \mathfrak{C}$$

Aus diesen Gleichungen ersieht man, dass die Summe der durchstrichenen Flächenräume nur durch die äusseren Kräfte des Systems bestimmt ist, indem die inneren Kräfte als paarweise gleich und entgegengesetzt in diese Gleichungen gar nicht eingehn. Integriren wir die Gleichungen für ein so kleines Bewegungselement, dass für dasselbe die äusseren Kräfte (und Drehungsmomente) als constant angesehen werden können, so erhalten wir

$$2\Sigma m\alpha = \frac{\mathfrak{A}t^2}{2} + At + a$$

$$2\Sigma m\beta = \frac{\mathfrak{B}t^2}{2} + Bt + b$$

$$2\Sigma m\gamma = \frac{\mathfrak{C}t^2}{2} + Ct + c$$

In einem Systeme, welches von äusseren Kräften gar nicht afficirt ist, in welchem also $\mathfrak{A} = \mathfrak{B} = \mathfrak{C} = 0$, können die durchstrichenen Flächenräume (wie bei gleichförmigen Drehungen) nur proportional der Zeit wachsen. Ist diese Summe in einem solchen System für irgend einen Zeittheil $= 0$, so muss sie für jeden Zeittheil $= 0$ bleiben, wenn nicht eine äussere Störung eintritt.

Nehmen wir an, unser freies Massensystem sei ein fester Körper, den wir in Drehung um eine Axe setzen. Wir bezeichnen den Drehungswinkel mit φ. Der Gleichung $2\Sigma m \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \mathfrak{A}$ entspricht dann diese: $(\Sigma mr^2)\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \mathfrak{A}$. In derselben bedeutet Σmr^2 das Trägheitsmoment und $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ die Winkelbeschleunigung. Das Trägheitsmoment ist eine Erweiterung des Massebegriffs, das Drehungsmoment eine Erweiterung des Kraftbegriffs.

Soll eine Masse eine Beschleunigung oder ein Massensystem eine Beschleunigung des Schwerpunktes erfahren, so ist hiezu ein bestimmbarer Kraftaufwand nöthig, der seine Quelle ausserhalb die-

ser Masse oder dieses Massensystems haben muss. Soll die Summe der durchstrichenen Flächenräume (in obiger Weise gezählt) eine Beschleunigung erfahren, so ist hiezu ein bestimmbares Drehungsmoment nöthig, welches seine Quelle ausserhalb des Systems haben muss. Ein Körper oder ein Körpersystem kann ohne äussere Ursache weder in fortschreitende noch in drehende Bewegung gerathen.

4.

Wir wollen uns nun diese theoretischen Bemerkungen durch einige Experimente und anschaulichere Betrachtungen erläutern. Wenn eine Masse m mit der Schwerebeschleunigung g auf einem Tisch liegt, so hat der Tisch diese Beschleunigung vernichtet. Druck und Gegendruck der Masse und des Tisches sind also durch mg bestimmt. Sinkt der Tisch mit constanter Geschwindigkeit, so bleibt die Beschleunigung der Masse noch immer vernichtet, der Druck noch immer mg. Sinkt aber der Tisch mit der Beschleunigung g', so ist die an der Masse m hervorgebrachte Geschwindigkeitsänderung in der Zeiteinheit $g - g'$ und demnach der Druck $m(g - g')$. Dieser Ausdruck übergeht in $m(g + g')$, wenn g' der Schwere entgegen gerichtet ist. Auf den mit Beschleunigung sinkenden Tisch würde die Masse einen kleineren Druck als ihr Gewicht, auf den mit Beschleunigung steigenden Tisch einen grösseren Druck und auf den frei fallenden Tisch gar keinen Druck ausüben.

Die Poggendorff'sche Fallmaschine (Fig. 2) demonstrirt diese Verhältnisse in sehr hübscher Weise. Eine Wage trägt statt der einen Wagschale eine Rolle. Ueber diese Rolle geht eine Schnur, die an beiden Enden die Gewichte P und $P + p$ trägt, deren grösseres durch einen Faden an der Axe der Rolle festgebunden ist. Nachdem die Wage aequilibrirt ist, brennt man diesen Faden ab. Die Gewichte an der Schnur beginnen eine Fallbewegung mit der Beschleunigung $\frac{p}{2P+p} \cdot g$. Da von den beiden Gewichten P das eine mit derselben Beschleunigung steigt als das

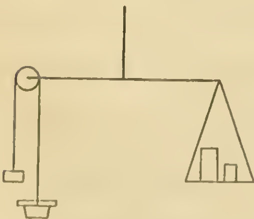


Fig. 2.

andere fällt, so hat diese Bewegung keinen Einfluss und es verhält sich so, als ob p allein mit der Beschleunigung $\frac{p}{2P+p}g$ fallen würde. Es wird also dabei die Druckverminderung $p\frac{p}{2P+p}$ eintreten, die Rolle wird während der Fallbewegung um diesen Betrag leichter und die Wage zeigt dies durch einen Ausschlag an. Der Ausschlag verschwindet, wenn von der andern Seite der Wage das Gewicht $p\frac{p}{2P+p}$ weggenommen wird.

Aehnliche Verhältnisse können wir an unserem eigenen Körper beobachten. Stehen wir auf einer ruhenden Unterlage, so trägt diese unser ganzes Gewicht und jeder Körpertheil trägt das ganze Gewicht des darüber befindlichen. Beginnt die Unterlage und damit unser Körper eine beschleunigte Bewegung abwärts, so vermindert sich sofort der Druck auf die Unterlage und jeder Körpertheil wird für die darunter befindlichen Körpertheile leichter. Beim freien Fall der Unterlage und des Körpers hört jeder Druck und Gegendruck vermöge der Schwere sowohl zwischen der Unterlage und unserem Körper, als auch zwischen den Theilen unseres Körpers auf. Die Extremitäten lasten nicht mehr auf den Gelenken, das Blut verliert sein Gewicht und wird durch die Gefässwände nicht mehr getragen, der ganze Körper verhält sich wie schwerlos. Dadurch sind jedenfalls die sonderbaren Empfindungen bedingt, die man beim Fallen und schon beim beschleunigten Sinken erhält. Ganz ähnliche Empfindungen müsste man haben, wenn man plötzlich auf einen Weltkörper von kleinerer Masse, also auch geringerer Schwerebeschleunigung, z. B. auf den Mond versetzt würde. Man müsste dort das Gefühl eines fortwährenden Versinkens, auf einem Weltkörper von grösserer Masse aber das Gefühl des fortwährenden Steigens haben. Diese rapiden und bedeutenden Veränderungen des Schweredrucks mögen es auch mit sein, welche die Seekrankheit hervorbringen.

Hirn hat zum Zwecke der Prüfung einiger Sätze der mechanischen Wärmetheorie in einem gleichförmig gedrehten Tretrade einen Mann einmal an der aufsteigenden Seite herabsteigen, dann an der herabsteigenden Seite heraufsteigen lassen und zwar so, dass er in beiden Fällen in absoluter Ruhe verblieb. Frägt man nun

hier nach der Arbeit, welche der Mann etwa in dem zweiten Falle leistet, so lehren uns die obigen Bemerkungen sofort, dass es auf die relative Beschleunigung zwischen dem Körper des Mannes und den Stufen des Rades ankommt, indem diese zu überwinden ist. Diese ist aber bei gleichförmiger Drehung des Rades die gewohnliche Schwerebeschleunigung. Die Arbeit ist aber dieselbe, als ob der Mann mit derselben Verticalgeschwindigkeit einen Berg ersteigen würde, worüber man sich täuschen könnte, wenn man bloss beachten würde, dass der Mann gar nicht von der Stelle kommt, also die Schwere scheinbar gar nicht überwindet.

Denken wir uns einen Vogel, welcher in constanter Höhe schwebt. Welche Arbeit muss er in der Zeiteinheit produciren, um sich zu erhalten? Ist seine Masse m', seine Schwerebeschleunigung g, so muss auf ihn vertical aufwärts die Kraft mg ausgeübt werden, er muss also in jeder Zeiteinheit der Masse m' die Geschwindigkeit g' ertheilen. Hiebei ist $mg = m'g'$. Die in der Zeiteinheit producirte lebendige Kraft oder Arbeit ist $m'\frac{(g')^2}{2}$ oder weil $g' = \frac{m}{m'}g$, so ist diese Arbeit $\frac{m^2g^2}{2m'}$. Man sieht hieraus, dass die Arbeit desto geringer ausfällt, je grösser die in der Zeiteinheit bewegte Masse m' ist, also mit je grösseren Flügeln und je langsamerem Flügelschlag der Vogel arbeitet. Die Arbeit wird $= 0$, wenn m' unendlich wird. Dieser Fall tritt ein, wenn der Vogel am Boden ruht.

5.

Uebergehn wir nun zur Veranschaulichung des Schwerpunktsprincipes. Ein Thier frei im Weltraume wäre nicht im Stande, sich von der Stelle zu bewegen. Es ist an seinen eigenen Schwerpunkt gebunden, und da letzterer unbeweglich ist, so muss er immer genau in derselben Lage sein, wenn seine Theile wieder in die gleiche relative Stellung kommen. Von der Bewegung der Theile einer Bombe, welche im Wurf geplatzt ist, wissen wir nichts zu sagen. Es ist aber nach dem Schwerpunktsprincip klar, dass von dem Luftwiderstande abgesehn und so lange kein Bombenstück einen Widerstand trifft, der gemeinsame Schwerpunkt fortfährt die Wurfbahn in derselben Weise zu beschreiben, als ob kein Zerspringen eingetreten wäre.

Wenn eine im Raume freie Maschine in Bewegung geräth, indem sich Theile derselben gegen einander verschieben, erfüllt sie das Schwerpunktsprincip. In der Regel muss bei Bewegung eines Theils auch der Körper der Maschine sich bewegen, damit der Schwerpunkt an Ort und Stelle bleiben kann. Desshalb sehen wir z. B. ein Dampfmaschinenmodell, welches nicht genug schwer oder nicht hinreichend befestigt ist, beim Gange in hüpfende Bewegung gerathen.

Betrachten wir einen Electromotor nach Page (Fig. 3) mit horizontaler Spule. Jedesmal wenn der Eisenkern in der Spule AB durch die innern Kräfte zwischen Spule und Kern nach rechts geht, erfährt der Körper des Motors einen Druck nach links, dem er auch folgt, wenn er etwa auf Rädchen $rrrr$ beweglich ist, so zwar, dass der Gesammtschwerpunkt an Ort und Stelle bleibt. Man sieht desshalb den Motor im Gange rasch hin- und herrücken. Dieses Rücken kann aufgehoben werden, wenn man auf eine

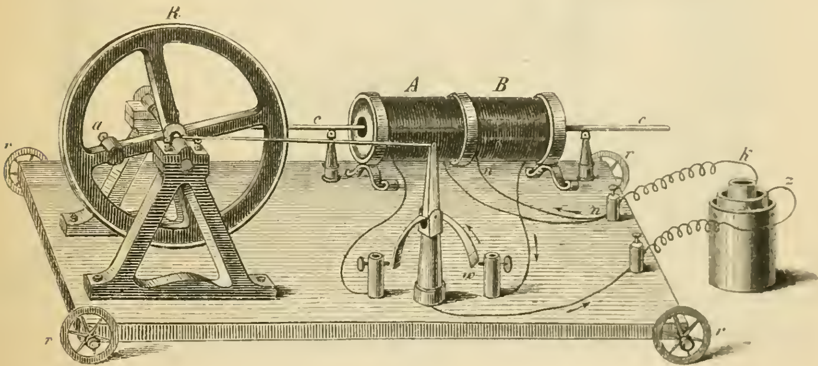


Fig. 3.

Speiche des Schwungrades R ein passendes Laufgewicht so aufschraubt, dass sich dasselbe dem Eisenkern stets entgegenbewegt und die durch denselben hervorgebrachte Schwerpunktsverschiebung gerade compensirt*). Dann wird es also unnöthig, dass diese Compensation durch den Motorkörper ausgeführt wird und derselbe bleibt in Ruhe. Bei den Locomotiven, bei welchen ein solches Rücken und Stossen vermieden werden muss, sehen wir eine derartige Com-

*) Mach, Carls Repertorium d. Experimentalphysik. Bd IV. S 350.

pensation an den Triebrädern angebracht. Wenn die Mannschaft auf einem Schiffe nach einem Ende hinlaufen würde, so erhielte dadurch das Schiff einen Ruck in entgegengesetzter Richtung. Diese Bewegung würde aber mit der Rückbewegung der Mannschaft wieder vernichtet.

Stellt sich die Mannschaft eines Schiffes in einen Kreis und beginnt eine Drehung etwa im Sinne des Uhrzeigers, so erhält das Schiff dadurch die verkehrte Drehung. Dies beruht auf dem Flächenprincip. Eine ähnliche Erscheinung können wir an jedem Electromotor demonstriren*). Bringen wir den Motor von Grüel (Fig. 4) mit oscillirendem Anker auf einer verticalen Axe so an, dass das Schwungrad horizontal liegt, wobei zweckmässig das gewöhn-

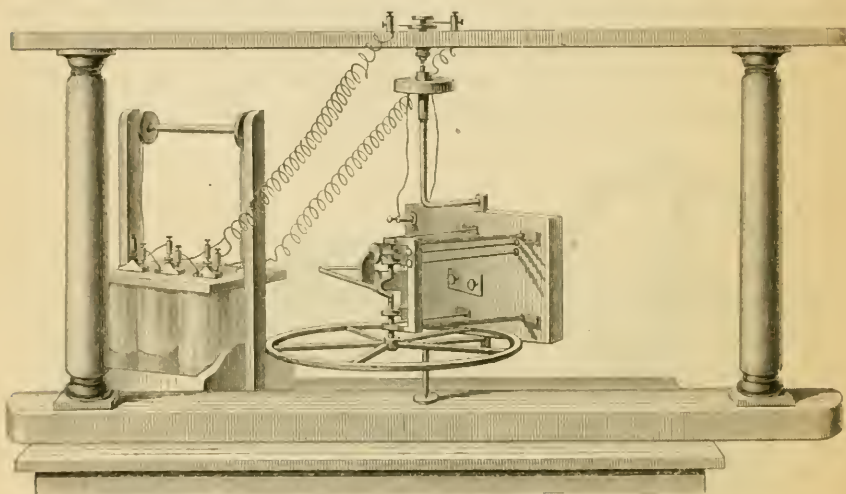


Fig. 4.

lich hölzerne Schwungrad durch ein massiveres von Metall ersetzt wird. Der ganze Motor ist nun um diese Verticalaxe beweglich und der Strom wird durch zwei kreisförmige Quecksilberrinnen *k* an der Axe so eingeleitet, dass diese Bewegung nicht behindert ist. Wir binden nun den Motorkörper mit einem Faden an das Stativ der Axe fest und leiten den Strom ein. Sobald das Schwungrad (von oben gesehn) sich im Sinne des Uhrzeigers zu drehen beginnt, zeigt der Motorkörper das Bestreben sich verkehrt zu drehen. Diese

*) Mach, a. a. O.

Drehung wird auch rapid ausgeführt, wenn man den Faden abbrennt. Wichtig ist bei dem Versuch, dass die Axe gut vertical steht.

Der Motor ist in Bezug auf die Axendrehung ein freies System. Wenn er in Ruhe, ist die in der Zeiteinheit durchstrichene Flächenraumsumme = 0. Kommt er durch die innern (electrischen) Kräfte zwischen Anker und Eisenkern in Bewegung, so liefert das Schwungrad für die Zeiteinheit sofort eine nach der bekannten Regel bestimmbare Flächenraumsumme. Die Gesammtsumme muss aber, weil bloss innere Kräfte spielen, = 0 bleiben. Demnach müssen die Flächenräume des Schwungrades durch entgegengesetzt beschriebene des Motorkörpers compensirt werden.

Eine eigenthümliche Erscheinung tritt ein, wenn man den Strom unterbricht. Rad und Motor fahren zunächst fort entgegengesetzt zu rotiren. Bald aber wird die Reibung merklich und bringt nach und nach die Theile des Motors in relative Ruhe gegen einander. Hiebei sieht man nun, wie die Bewegung des Motorkörpers immer langsamer wird und schliesslich sich dem Sinne nach umkehrt. Der ganze Motor rotirt also dann so, wie anfänglich das Schwungrad allein sich bewegt hat. Die Erklärung des Vorganges ist einfach. Das System ist kein vollkommen freies, es ist durch den Widerstand der Axe und durch die Axenreibung behindert. Bei einem vollkommen freien System hätte die Summe der durchstrichenen Flächenräume, da bloss innere Kräfte wirkten, immer = 0 sein müssen. Sobald also die Theile in relative Ruhe gegeneinander gekommen wären, hätte der Motor wieder in Ruhe sein müssen. Nicht so hier. Die Reibung an der Schwungradaxe vermindert die Flächenraumsumme sowohl für das Rad wie für den Körper. Die Reibung an der Hauptaxe aber wirkt bloss vermindernd auf die Flächenraumsumme des Körpers, jene des Rades bleibt also im Ueberschuss und dies äussert sich bei Unterbrechung des Stromes. Der ganze Vorgang nach Unterbrechung des Stromes ist ein schönes Bild desjenigen, welcher nach Voraussetzung der Astronomen am Monde eingetreten ist. Die von der Erde erregte Fluthwelle hat die Rotation des Mondes derart vermindert, dass der Mondtag zur Dauer eines Monats angewachsen ist. Das Schwungrad stellt die durch die Fluth bewegte Wassermasse vor.

Letzteren Vorgang kann man noch auf andere Weise demonstriren. Ein an dem Stativ *S* leicht drehbarer Hebel *HH* (Fig. 5) ist mit zwei Bohrungen *bb* versehen, in welche man die Axen der bekannten Schmidt'schen Kreisel *kk* steckt, die man bekanntlich in der Hand kann anlaufen lassen. Laufen beide Kreisel in demselben Sinn, so kommt bald der ganze Hebel *HH* in rapide Rotation übereinstimmend mit den Kreiseln.

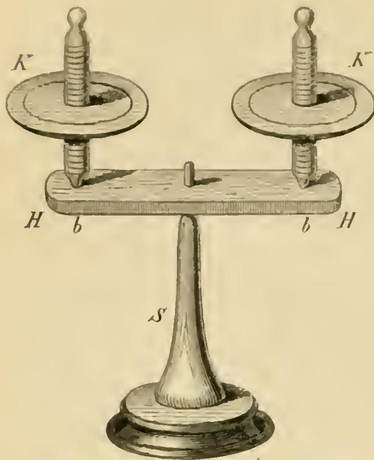


Fig. 5.

Auch ohne den Strom wirken zu lassen, kann man beobachten, dass das Schwungrad des Motors die Drehung zunächst nicht mitmacht, wenn man den Körper rasch in Rotation versetzt. Umgekehrt, hat der Motor längere Zeit rotirt und man hält den Körper plötzlich an, so behält das Rad zunächst seine Rotation bei. Diese Beobachtung, die sich übrigens an jeder Taschenuhr und deren Unruhe hinreichend gut anstellen lässt, zeigt, dass jeder Körpertheil, so viel er kann, das Flächenprincip befolgt.

6.

Wir werden das Experiment noch in einer andern Art anstellen, welche die nöthigen Variationen erlaubt. Wir nehmen eine Kreiselscheibe, deren Axe in einem Ring sehr leicht läuft, und befestigen sie mit verticaler Axe an der Scheibe einer Centrifugalmaschine, nachdem wir zuvor, um die Drehungen leicht zu erkennen, an der Kreiselscheibe und an der Centrifugalscheibe Papiere mit Sectoren bemalt angebracht haben. Beim Beginn der Drehung der Centrifugalmaschine bleibt die Kreiselscheibe in Ruhe und wird erst allmälig mitgenommen. Beim Anhalten der Maschine nach längerer Rotation dreht sich im Gegentheil die Kreiselscheibe weiter.

Kann ein Körpertheil das Flächenprincip nicht vollständig erfüllen, so tritt, wo dies möglich ist, eine theilweise Erfüllung ein. Wir schrauben ein Holzstück von der Form AB (Fig. 6) auf die Scheibe der Centrifugalmaschine. An demselben befestigen wir den Ring R der Kreiselscheibe k mit einem Gelenk a derart, dass die Axe ab eine beliebige Neigung gegen die verticale Rotationsaxe der Centrifugalscheibe annehmen kann. Diese Neigung fixiren wir durch einen Faden bn, der durch ein Loch des Holzstückes an ein Häkchen h geht, das ziemlich genau in der Rotationsaxe liegt. Sobald nun der Winkel der Kreiselscheibenaxe mit der Axe der Centrifugalmaschine von 90^0 verschieden ist, beobachtet man bei jeder Bewegung des Apparates die eben beschriebenen Erscheinungen, welche allerdings desto schwächer sind, je mehr sich dieser Winkel 90^0 nähert, und welche bei 90^0 vollständig verschwinden. Es beruht dies auf der Zusammensetzung der Drehungen. Wäre die Flächenraumsumme, welche die Kreiselscheibe bei vollkommener Freiheit in der Zeiteinheit geben würde, f, so ist sie bei der Neigung der beiden Axen um den Winkel α nur $f. \cos \alpha$.

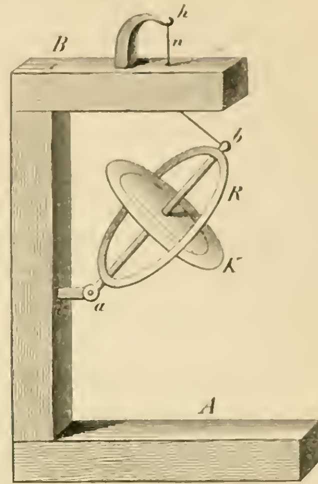


Fig. 6.

Wir stellen nun mit Hilfe des Fadens bn die Axe der Kreiselscheibe ab horizontal, wobei also der Winkel $\alpha = 90^0$ wird. Die erwähnten Erscheinungen treten nun nicht ein. Nachdem die gleichförmige Rotation eine Zeit lang unterhalten worden ist, brennen wir bei fortdauernder Rotation mit einer langen Stichflamme bei n den Faden ab. Die Scheibe fällt nun herab, so dass ab vertical abwärts gerichtet ist. Zugleich sehn wir, dass die Kreiselscheibe sich nicht dreht, sondern ruhig ist. Sie hat also die Rotation gar nicht angenommen. Es versteht sich, dass für dieses und das folgende Experiment das Stück ac bedeutend länger sein muss,

als dies der Raumersparniss wegen in der Zeichnung angegeben ist.

Wir binden die Scheibe mit Hilfe des Fadens so fest, dass die Axe *ab* vertical aufwärts gerichtet ist, und brennen den Faden nach längerer gleichförmiger Rotation ohne diese zu unterbrechen ab. Die Scheibe fällt so herab, dass *ab* vertical nach unten gerichtet und die Scheibe nun ihre vorher obere Seite nach unten kehrt, dass sie also vollständig umgeklappt wird. Hiebei rotirt nun die Scheibe, welche die Winkelgeschwindigkeit der Centrifugalmaschine angenommen hat, selbstverständlich sofort im entgegengesetzten Sinne, indem sie ihre Geschwindigkeit beibehält, dem Beobachter aber die andere Seite präsentirt. Von diesem Fall werden wir eine hübsche Anwendung machen.

Knüpfen wir hieran eine physikalische Bemerkung. Denken wir uns eine schwere, sehr leicht bewegliche horizontale scheinbar ruhende Scheibe. Diese muss die Winkelgeschwindigkeit annehmen, welche ihr vermöge der Neigung gegen die Axe der Erdrotation zukommt. Könnten wir nun diese Scheibe rasch in ihre eigene Ebene umklappen, so müsste sie vermöge ihrer Trägheit die doppelte Winkelgeschwindigkeit zeigen, welche dem Foucault'schen Pendel an demselben Orte zukommt.

In dieser Form ist das Experiment schwer ausführbar, es dürfte aber in der folgenden kaum auf Schwierigkeiten stossen. Wir denken uns eine schwere verticale Scheibe mit horizontaler Axe. Die Axe selbst soll in einer Spitze aufgehängt sein (oder schwimmen), so dass sie sich sehr leicht horizontal bewegen kann. Der Schwerpunkt der Scheibe liegt fast vertical über der Axe und die Scheibe ist durch einen Faden fixirt. Brennt man letzteren Faden ab, so macht die Scheibe fast eine halbe Drehung, ihr südlicher Rand tritt beispielsweise an die Stelle des nördlichen und die Axe muss nun die doppelte Winkelgeschwindigkeit des Foucault'schen Pendels zeigen.

7.

Ein freies Massensystem *A* erfüllt das Schwerpunkts- und Flächenprincip. Wenn das Massensystem *A* nicht frei, sondern ganz oder theilweise an ein Massensystem *B* gebunden ist, so wird das

Schwerpunkts- und Flächenprincip für A nicht mehr gelten, aber die Abweichungen des A von beiden Principien sind dann durch die Kräfte, die B auf A ausübt, hervorgebracht und dieselben Kräfte muss nun auch A auf B ausüben. Bei jeder Bewegung werden sich also die Abweichungen, zu welchen A gezwungen wird, als Züge und Pressungen auf B äussern.

Wir wollen nun die erleichternde Annahme machen, welche für die meisten Fälle auch ausreicht, dass sowohl A wie B einfach feste Körper sind. Dem Obigen gemäss sind dann folgende Grundsätze unmittelbar verständlich. Wenn A die Masse m und die Beschleunigung φ hat, welche letztere durch den Körper B von der Beschleunigung φ' relativ gegen diesen aufgehoben oder relativ gegen denselben in ψ umgewandelt werden soll, wobei alle Beschleunigungen in demselben Sinne positiv gezählt werden, so ist hiezu die Kraft $m(\varphi' - \varphi)$, beziehungsweise $m[\psi + (\varphi' - \varphi)]$ erforderlich. Diese muss aber von B auf A und auch von A auf B ausgeübt werden.

Das gleiche Gesetz wie für die Progressivbewegungen gilt auch für die drehenden Bewegungen. Hat der Körper A in Bezug auf die auszuführende Drehung das Trägheitsmoment T und die Winkelbeschleunigung φ und wird diese durch den Körper B von der Winkelbeschleunigung φ' relativ gegen letzteren aufgehoben oder in ψ umgewandelt, so ist das hiezu erforderliche statische Moment $T(\varphi' - \varphi)$, beziehungsweise $T[\psi + (\varphi' - \varphi)]$. Dieses Drehungsmoment muss hiebei B auf A und A auf B ausüben.

8.

Wenn wir uns activ bewegen, so mögen schon die mechanischen Leistungen der Muskel mit Empfindungen verbunden sein, welche uns über die ausgeführte Bewegung belehren. Ausserdem werden sich nach den angegebenen Grundsätzen noch viele andere Quellen von Bewegungsempfindungen auffinden lassen. Die gewöhnlich wirkenden Bewegungsursachen und Bewegungshindernisse wirken nicht gleichzeitig auf die ganze Masse unseres Körpers, sondern stets nur auf einen kleinen Theil. Sitzen wir in einem Wagen, welcher in Bewegung geräth, so wird zunächst unsere Haut verhindert, das Schwerpunkts- und Flächenprincip zu erfüllen, diese afficirt weiter Muskel, Knochen, Bindegewebe, das Blut und die übri-

gen Flüssigkeiten des Körpers. Jeder Körpertheil wird auf jeden andern Pressungen und Zerrungen ausüben müssen und so vielfach diese Pressungen und Zerrungen empfunden werden können, so vielfach werden die Bewegungsempfindungen sein. Bei der activen Bewegung wird ebenfalls ein Körpertheil durch den andern bewegt und es gelten also dieselben Betrachtungen.

Bewegungsempfindungen können also entstehn durch Pressungen und Zerrungen der Haut, durch Affection der sensiblen Nerven in den Knochen, Muskeln und im Bindegewebe, durch die Muskelgefühle, welche bei Erhaltung oder Aenderung der Stellung der Körpertheile während der Bewegung auftreten. Möglicher Weise könnte auch (wie Purkynè angenommen hat) das Hirn seinen eigenen Druck empfinden. Sind die vasomotorischen Nerven mit sensiblen verbunden, so wäre auch eine directe Empfindung des Gewichtes und der Vertheilung der Blutmasse möglich. Auch der Gesichtssinn bleibt nicht unafficirt. Wir werden nun durch die weitere Untersuchung sehn, dass wahrscheinlich alle bisher aufgezählten Empfindungen, so weit sie überhaupt existiren, nur nebensächlich sind und die wichtigsten Bewegungsempfindungen muthmaasslich von einem besondern Organ herrühren. Sollte aber auch dieses Resultat durch künftige Untersuchungen alterirt werden, so werden doch die in diesem Capitel aufgestellten Grundsätze wohl immer benützt werden müssen, um die Quellen der Bewegungsempfindungen aufzufinden. Damit werden aber die folgenden Versuche immer einen gewissen Werth behalten.

Die Erscheinungen an bewegten Menschen und Thieren.

1.

Wenn man sagt, dass die Bewegung empfunden werde, so ist dies kein erschöpfender und genau genommen kein richtiger Ausdruck der Thatsachen. Es gibt sehr heftige Bewegungen, die gar nicht empfunden werden. Man muss sagen, welcher Umstand der Bewegung empfunden wird. Die mechanische Wechselwirkung der Massen besteht in gegenseitiger Beschleunigung. Es hat also

von vorn herein eine grosse Wahrscheinlichkeit, dass bloss Beschleunigungen empfunden werden.

Befindet man sich auf einem mit constanter Geschwindigkeit bewegten Eisenbahnzuge, so fühlt man nur die kleinen Erschütterungen, welche in geringen abwechselnden Beschleunigungen und Verzögerungen unseres Körpers bestehn, die sich weil die mittlere Geschwindigkeit eben constant bleibt die Wage halten. Diese Erschütterungen bleiben dieselben, ob der Zug vor- oder rückwärts fährt. In der That kann man sich bei geschlossenen Augen beides gleich leicht vorstellen und kann ohne Schwierigkeit von der einen Vorstellung zur andern übergehn. Dies ist nicht mehr möglich, wenn der Zug im Abfahren oder Anhalten begriffen ist, also die mittlere Beschleunigung von Null verschieden ist und einen bestimmten Sinn hat.

Fährt man auf der Eisenbahn durch eine starke Krümmung, so scheinen die Häuser und Bäume oft beträchtlich von der Verticalen abzuweichen und zwar scheint sich der Gipfel der Bäume auf der convexen Seite der Krümmung von der Bahn wegzuneigen. Anderseits bemerkt man sehr oft auch eine Schiefstellung des Wagens und hält nun die Häuser und Bäume für vertical.

Bekanntlich wird die Schiene auf der convexen Seite der Krümmung etwas höher gelegt um die Wirkung der Centrifugalkraft zu compensiren. Der Höhenunterschied kann aber nur einer einzigen Fahrgeschwindigkeit entsprechen. Die beiden erwähnten einander scheinbar widersprechenden Facta klären sich nun einfach auf, wenn man annimmt, dass man die Richtung der Verticalen empfindet und stets die Richtung der aus Schwere und Centrifugalkraft resultirenden Massenbeschleunigung für die verticale hält.

Fährt man mit jener Geschwindigkeit, welche der Krümmung und dem Höhenunterschiede der Schienen entspricht, so weiss man nichts von der Schiefstellung der Wagens. Dann scheinen die Häuser und Bäume schief. In jedem andern Falle erscheint der Wagen schief.

2.

Die folgenden Versuche, welche zunächst durch die angeführten Beobachtungen und den Wunsch die Erscheinungen unter Umstän-

den zu studiren, die man mehr in der Hand hat, veranlasst sind, wurden nach demselben Princip angestellt, welches schon Knight*) angewandt hat, um den Einfluss der Schwere auf das Wachsthum der Pflanzen zu untersuchen. Die Versuche sind zum Theil schon von Purkyně ausgeführt und ich hätte mir, wenn mir gleich bei Beginn meiner Arbeit die Purkyně'sche Abhandlung bekannt gewesen wäre, manche Mühe ersparen können. Wahrscheinlich wäre ich aber dann auf viele neue Versuche gar nicht verfallen.

Ich will nun zunächst meinen Apparat beschreiben. Man denke sich einen verticalen Holzrahmen *R* (Fig. 7), 4m lang, 2m hoch, um eine durch seine Mitte gehende verticale Axe *A* leicht drehbar. In diesem befindet sich ein zweiter kleinerer verticaler Rahmen *r*, ebenfalls um eine verticale Axe *a* drehbar, welche in beliebige Distanz von der ersten Axe gebracht werden kann. Letzterer Rahmen trägt einen Stuhl, welcher sich um eine horizontale Axe *α* neigen lässt. Der Beobachter, welcher auf diesem Stuhl Platz nimmt, kann in die

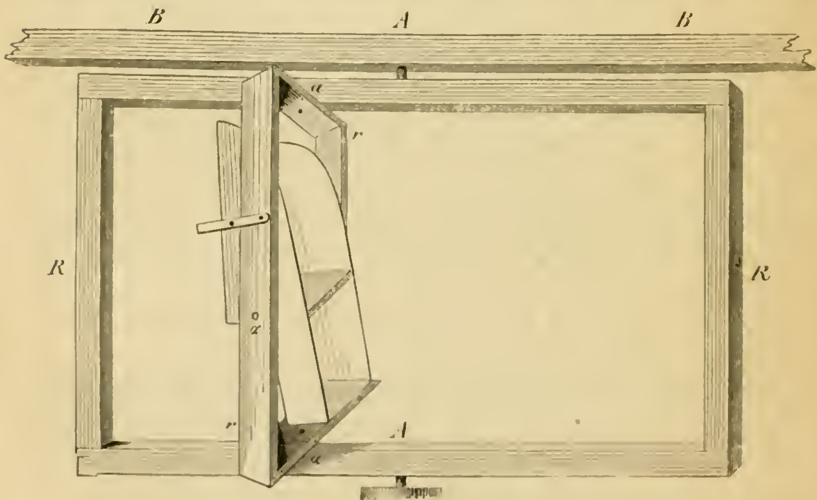


Fig. 7.

Rotationsaxe *A*, um die der ganze Apparat in Umschwung versetzt wird, oder in beträchtliche Entfernung von derselben gebracht werden. Er kann in letzterem Falle vermöge der Drehbarkeit um *a*

*) Philosophical transactions 1806.

sowohl nach A hin sehen, als auch senkrecht auf die Ebene von A und a hinausblicken. Endlich kann dem Beobachter vermöge der Drehbarkeit um a eine mehr horizontale oder mehr verticale Lage gegeben werden. Um endlich den Gesichtsschwindel auszuschliessen, kann der ganze Beobachter in eine Art Papierkasten eingeschlossen werden. Der Apparat hat im Laufe der Versuche vielfache Veränderungen erfahren und neue Theile erhalten, welche an den betreffenden Stellen zur Sprache kommen.

3.

Wir betrachten zunächst die auf die Rotation bezüglichen Versuche.

Versuch 1. Der Beobachter wird in den Papierkasten eingeschlossen und um die Axe a geneigt, so dass er allmälig aus der Verticalstellung in die Rückenlage kommt. Hiebei gibt er mit einem Stabe, der aus dem Kasten hervorragt, die Richtung an, welche er für vertical hält. Diese Angabe ist anfänglich ziemlich genau. Bei starker Annäherung an die Rückenlage hält jedoch der Beobachter seine Abweichung von der Verticalen für kleiner als sie wirklich ist.

Versuch 2. Der Beobachter wird aufrecht sitzend in die Rotationsaxe A gebracht, in den Papierkasten eingeschlossen und in Rotation um die Verticalaxe versetzt. Jede Drehbewegung wird sofort dem Sinne nach und der beiläufigen Grösse nach erkannt. Erhält man aber einige Secunden lang die Rotation gleichförmig, so hört allmälig das Gefühl der Drehung ganz auf. Es tritt das Gefühl einer entgegengesetzten Drehung auf, wenn man den Apparat sich selbst überlässt, so dass er einen verzögerten Gang annimmt. Dies Gefühl der Gegendrehung wird äusserst heftig, wenn man den Apparat plötzlich anhält, und dauert je nach der Stärke der Rotation allmälig abnehmend einige Secunden. Treibt man das Experiment zu weit, so stellt sich auch Eingenommenheit des Kopfes und Ekel ein. Man empfindet also nicht die Winkelgeschwindigkeit, sondern die Winkelbeschleunigung.

Bei diesem Versuche bemerkt man noch eine optische Erscheinung. Im Innern des Papierkastens befindet sich ein verticaler Strich und darauf ein Stern, den man fixiren kann. Sobald der Apparat angehalten wird, hat man den Eindruck, als ob man sammt dem Kasten eine Gegendrehung ausführen würde. Oeffnet man

rasch den Kasten, so dreht sich der ganze sichtbare Raum mit seinem ganzen Inhalt. Es sieht so aus, als ob der sichtbare Raum sich in einem zweiten Raum drehen würde, den man für unverrückt fest hält, obgleich letzteren nicht das mindeste Sichtbare kennzeichnet. Man möchte glauben, dass hinter dem Sehraum ein zweiter Raum steht, auf welchen ersterer immer bezogen wird. Diese Thatsache von fundamentaler Wichtigkeit muss man selbst erfahren. Sie lässt sich nicht gut beschreiben. Die Erscheinung ist auch nie so characterisirt worden, wie ich es hier gethan habe, auch von Purkyně nicht, welcher am besten beobachtet hat.

Merkwürdig ist beim raschen Anhalten des Apparates noch das Gefühl, als ob die Gegendrehung mit einem gewissen Widerstande ausgeführt würde. Man meint sich namentlich mit dem Kopfe wie in einem zähen Brei zu bewegen.

Der Versuch gelingt bei jeder Lage des Körpers und Kopfes gegen die Rotationsaxe. So lange man sich ruhig verhält, ist die Rotationsaxe nach dem Anhalten auch immer die Axe der scheinbaren Gegendrehung. Die Körperlage kann mit Hilfe der Axe α variirt werden. Auch habe ich in dem Rahmen R ein horizontales Brett angebracht und mich bequem darauf gelegt, so dass alle Körpertheile gut unterstützt waren, ohne eine Aenderung der Erscheinungen zu beobachten. Es ist hiebei einerlei, ob man auf dem Rücken oder auf der Seite liegt.

Versuch 3. Halten wir bei dem Versuch 2 den Apparat plötzlich an und setzen wir ihn nach $1^1/_2$—2 Secunden wieder plötzlich in demselben Sinne in Bewegung. Das Gefühl der Gegendrehung, welches in der Pause auftritt, verschwindet, so wie die Bewegung wieder eingeleitet ist. Die durch eine Winkelbeschleunigung erzeugte Drehempfindung hat also eine beträchtliche Nachdauer und kann durch eine entgegengesetzte Winkelbeschleunigung aufgehoben werden.

Versuch 4. Neigt man bei Versuch 2 den Kopf nach vorn und richtet ihn nach dem Anhalten des Apparates wieder auf, so meint man, wenn die subjective Drehung von rechts nach vorn und links stattgefunden hat, sich von rechts nach oben und links zu drehen, so dass man ein Umstürzen nach der Seite fürchtet. Man

sieht aus diesem Versuch, welchen mit vielen analogen in weniger reiner und bequemer Form schon Purkyně angestellt hat, dass die Stellung des Kopfes maassgebend ist. Man kann so zu sagen mit der nachdauernden Drehempfindung den Kopf in eine beliebige Lage bringen und die Axe der scheinbaren Drehung, welche durch die anfängliche wirkliche Drehung bestimmt ist, macht alle Bewegungen des Kopfes mit, ihre Lage im Kopfe ist unveränderlich.

Versuch 5. Wir bringen nun den Beobachter 1^m weit von der Rotationsaxe A in nahe verticale Stellung, lassen ihn gegen die Axe A hinsehn und bringen ihn in Rotation. Bald nachdem die Winkelgeschwindigkeit des in den Papierkasten eingeschlossenen Beobachters constant geworden ist, hört jedes Drehgefühl auf. Der Beobachter meint bloss mehr auf dem Rücken zu liegen, als dies wirklich der Fall ist. Man empfindet die Richtung der resultirenden Massenbeschleunigung und hält diese für die Verticale.

Versuch 6. Wir lassen Alles wie im Versuch 5, nur stellen wir den Beobachter durch Drehung des Rahmens r um die Axe a so, dass er senkrecht gegen die Ebene der Axen A und a hinausblickt. Uebrigens bleibt er in dem Papierkasten eingeschlossen, auf dessen Innenseite sich ein verticaler Strich befindet. Sobald die Rotationsgeschwindigkeit constant geworden ist, meint der Beobachter sammt dem Kasten constant seitwärts geneigt zu sein, und zwar glaubt er sich mit dem Kopfe von der Rotationsaxe weg zu neigen. Beim Anhalten des Apparates glaubt er sich sammt der Umgebung wieder aufzurichten, wie dies auch im vorigen Versuche geschieht. Wir folgern aus diesem Versuche wie aus 5, dass man die Richtung der Massenbeschleunigung als Verticale empfindet. Diese Seitwärtsneigung hat schon Purkyně auf der Scheibe eines Ringelspiels beobachtet.

Versuch 7. Hängt man bei Versuch 6 in den Papierkasten ein Pendel mit einem Gradbogen, so sieht man, dass bei den erreichbaren Rotationsgeschwindigkeiten dasselbe 10—20° ausschlägt, was eine Centrifugalbeschleunigung angibt, die rund $^1/_5$—$^1/_3$ der Schwerebeschleunigung beträgt. Dieses Pendel hält man nun bei der Rotation für vertical, den Kasten und sich selbst

aber für schief. Doch schien es mir zuweilen, als ob die Verticale zwischen der Richtung des Pendels und der Axe meines Körpers enthalten wäre.

Versuch 8. Wenn wir in Versuch 5 den Apparat plötzlich anhalten, glaubt sich der Beobachter sammt dem Kasten für einen Moment seitwärts zu neigen und zwar mit dem Kopfe im Sinne der Rotation. Jede momentane Progressivbeschleunigung, deren Richtung nicht mit der wahren Verticalen zusammenfällt, ändert momentan die scheinbare Verticale.

Versuch 9. Bisher war der Rahmen r in R durch eine Schraube festgestellt. Nun machen wir ihn durch Lockern der Schraube leicht drehbar. Setzen wir den Apparat durch einen raschen Stoss in Rotation, so behält nun der im Kasten eingeschlossene Beobachter (nach dem Flächenprincip) eine Zeit lang seine Stellung bei, d. h. er wird im Kreise geschwungen, ohne sich zu drehen. Die Richtung der Centrifugalkraft geht dann um ihn herum. Dem entsprechend glaubt sich der Beobachter in einer Kegelfläche zu bewegen, deren Axe die Verticale ist.

4.

Die eben beschriebenen Erscheinungen gehören grösstentheils dem Gebiet des sogenannten Drehschwindels an. Auf eine Theorie des Drehschwindels wollen wir uns hier zunächst nicht einlassen. Wir bemerken nur, dass alle Erscheinungen sich von selbst verstehn, wenn wir annehmen, dass es eine Empfindung der Winkelbeschleunigung gibt. Wird die Winkelbeschleunigung empfunden, so muss die aufhörende Drehung als eine entgegengesetzte Drehung empfunden werden, weil sie entgegengesetzt beschleunigt, d. h. verzögert ist.

Es ist ferner klar, dass die Empfindung der Beschleunigung viel länger anhält, als die Beschleunigung selbst. Denn sehr bald nach Unterbrechung der Drehung werden alle Massenbeschleunigungen aufgehört haben, während man noch immer eine Bewegung empfindet.

Dass auch die Richtung von Progressivmassenbe-

schleunigungen empfunden wird, geht aus den beschriebenen Versuchen ebenfalls hervor.

So weit liesse sich alles durch die Empfindlichkeit des ganzen Körpers noch leidlich erklären, allein in mehreren der beschriebenen Versuche äussert sich der enorme Einfluss der Kopfstellung auf die Erscheinungen und damit ergibt sich, was später noch genauer begründet werden soll, dass ein sehr wichtiger, wo nicht der wichtigste Beitrag zu den Bewegungsempfindungen im Kopfe ausgelöst wird.

5.

Uebergehn wir nun zu einer andern Reihe von Rotationsversuchen.

Versuch 1. Legt sich der Beobachter horizontal auf ein in dem Rahmen R angebrachtes Brett etwa auf's rechte Ohr, so verschwindet bei gleichförmiger Drehung bald die Empfindung derselben. Kehrt sich nun der Beobachter rasch vom rechten auf's linke Ohr um, so tritt die Empfindung der Rotation sehr viel heftiger auf wie beim ersten Anstosse. So oft man sich während der gleichförmigen Rotation um eine Horizontalaxe um 180° dreht, tritt eine starke Auffrischung des Drehgefühls auf. Das physikalische Analogon des Versuches ist leicht herzustellen. Man setzt sich in den Apparat und nimmt eine gut laufende Sirene mit, deren Scheibe man horizontal hält. Ist die Rotation gleichförmig geworden und hat die beim ersten Anstoss in Bewegung gerathene Sirenenscheibe aufgehört zu rotiren, so tritt die Rotation derselben immer der Bewegung des Rahmens R entgegen mit doppelter Geschwindigkeit auf, sobald man die Scheibe in ihre eigene Ebene von 180° umklappt.

Aehnliche Erscheinungen zeigen sich objectiv, wenn man die Stellung der Scheibe während der gleichförmigen Rotation und subjectiv, wenn man die Lage des Körpers oder nur jene des Kopfes ändert. Die Erklärung der Erscheinungen im Princip ist einfach. Erfährt der Rahmen eine Winkelbeschleunigung (von oben gesehn) im Sinne des Uhrzeigers, so wird diese den Massentheilen unseres Körpers, speciell des Kopfes, aufgedrungen und als Drehung im Sinne des Uhrzeigers empfunden. Der umgedrehte Körper würde

nun das Flächenprincip oder Trägheitsgesetz erfüllend gleichförmig dem Uhrzeiger entgegen rotiren, wird aber durch den Apparat verhindert, der ihm die Uhrzeigerbewegung mittheilt, also Beschleunigungen von demselben Sinn wie zuvor aufdringt. Damit entsteht also von Neuem die Empfindung der Uhrzeigerdrehung.

Versuch 2. Man setzt sich in den Rahmen, etwa in die Rotationsaxe. Hält man den Kopf ruhig, so verschwindet bei gleichförmiger Drehung das Drehungsgefühl. Jede Drehung des Kopfes um eine der Rotationsaxe des Rahmens nicht parallele Axe bringt aber sofort ein eigenthümliches Drehungsgefühl hervor.

Nennen wir eine der Rotationsaxe des Apparates parallele Axe A, B die Axe, um welche der Kopf gedreht wird, und C diejenige, um welche die scheinbare Drehung geschieht. Die Axen wollen wir durch Pfeile bezeichnet denken und zwar so, dass für einen Beobachter mit dem Kopf in der Spitze, dem Fuss im Schwanze des Pfeiles, die Rotation unter den Füssen im Sinne des Uhrzeigers vor sich geht. Die Regel aller hieher gehörigen Erscheinungen ist nun diese: Legen wir die Schwänze der Pfeile A, B, C in denselben Punkt, so haben wir C senkrecht gegen die Ebene AB zu stellen, jedoch so, dass für den Beobachter mit dem Kopfe in der Spitze von C, B durch Drehung um weniger als 180° im Sinne des Uhrzeigers aus A hervorgeht.

Die Axe der scheinbaren Drehung steht also immer senkrecht auf der Ebene, welche die Axe des Apparates und die Drehungsaxe des Kopfes enthält. Die scheinbare Drehung, welche durch eine einfache Kopfwendung erregt wird, dauert bei gehöriger Stärke einige Secunden nach. Sie kann sofort durch eine rasch folgende entgegengesetzte Kopfwendung aufgehoben werden.

Rotirt der Apparat von oben gesehn wie der Uhrzeiger (gewöhnlich etwa mit einem Umlauf in 4 Secunden) und man nickt bejahend mit dem Kopfe, so dreht sich jede Ebene, die man ansieht, in sich selbst wie der Uhrzeiger. Bei abwechselndem Heben und Senken des Kopfes scheint der Papierkasten, in welchem sich der Beobachter bei allen diesen Versuchen befindet, das Rollen eines Seeschiffes nachzuahmen.

Wie man sofort erkennt, sind die beschriebenen sub-

jectiven Erscheinungen analog denjenigen, welche man objectiv an der Fessel'schen oder Bohnenberger'schen Schwungmaschine wahrnehmen kann und die man zur Demonstration der Präcession der Nachtgleichen verwendet. Die detaillirte Erklärung ergibt sich sehr einfach mit Hilfe der Poinsot'schen Drehungstheorie. Wir kommen auf dieselbe noch zurück.

Auch diese Versuchsreihe demonstrirt die Empfindung der Beschleunigung, die Nachdauer derselben und weist den Sitz der Bewegungsempfindungen im Kopfe nach.

6.

Die Empfindungen der Drehung sind viel auffallender und führen in Form des Drehschwindels leichter zu Täuschungen, als diejenigen Empfindungen, die mit der progressiven Bewegung zusammenhängen. Es lässt sich aber vermuthen, dass solche Empfindungen existiren. Es geht dies schon zum Theil aus den vorher beschriebenen Experimenten hervor. Neue Experimente, welche direct auf die Untersuchung solcher Empfindungen ausgehn, lassen sich leicht auffinden.

Die Empfindungen beim Fallen und beschleunigten Sinken wurden schon erwähnt. Sie zeigen sich in geringerer Intensität auch schon beim Schaukeln, und wir wollen daher ein derartiges Experiment zuerst besprechen.

Versuch 1. Denken wir uns eine grosse gleicharmige Wage. Jeder Wagbalken hat 2^m Länge. Auf einer Wagschale befindet sich der Beobachter und ist durch Gegengewichte auf der andern aequilibrirt. Wird die Wage in Schwingungen versetzt, so führt der Beobachter fast eine reine pendelförmige Verticalschwingung aus. Darin ist also der Versuch einfacher und reiner, als derjenige, den man mit einer gewöhnlichen Schaukel ausführen kann. Nennen wir die Verticalexcursion von der Gleichgewichtslage an x, ihr Maximum a, die Schwingungsdauer der Wage T und t die Zeit, so ist

$$x = a \sin \frac{2\pi t}{T}$$

und die Beschleunigung

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -a\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin \frac{2\pi t}{T}$$

Man kann also aus dem Excursionsmaximum und der Schwingungsdauer die Schwankungen der Verticalbeschleunigung berechnen. War $a = 15^{cm}$ und $T = 7$ Secunden, so war das Maximum der Verticalbeschleunigung 12^{cm}, also rund 0.012 der Schwerebeschleunigung. Dann waren aber die Schwankungen für den Beobachter mit bedeckten Augen an der Grenze der Merklichkeit. Wurden die Excursionen etwas grösser, so gab der Beobachter jedesmal an, er sinke, kurz vor dem Anlangen an dem höchsten Punkt der Schwingung oder auf diesem selbst. Ebenso wurde das Steigen immer kurz vor oder an dem tiefsten Punkt bemerkt, natürlich immer bei geschlossenen Augen. Wie die Formel zeigt, ist in der That die Beschleunigung abwärts ein Maximum im höchsten Punkt der Schwingungsbahn und die Beschleunigung aufwärts ein Maximum im tiefsten Punkt der Schwingungsbahn.

Man ist also auch für Schwankungen in der Grösse der Schwerebeschleunigung sehr empfindlich und man empfindet bei Verticalbewegungen nicht die Lage oder die Geschwindigkeit, sondern die Beschleunigung. Man hat die Empfindung der Beschleunigung auch im Kopfe, doch schien es mir bei diesen Versuchen mehr wie bei den vorigen, dass man die Empfindung im ganzen Körper habe und zwar in den tiefstgelegenen Theilen am meisten.

Wir begreifen nach den bekannten mechanischen Grundsätzen, wie der Körper auf der schwingenden Wage, sich und seinen Inhalt abwechselnd schwerer und leichter empfindet. Nehmen wir die Schwankungen grösser, etwa $2a = 9^{m}$ und $T = 10$ Secunden, wie sie etwa bei einem grossen Schiff auf hoher See vorkommen, so betragen die Schwankungen 0.18 der Schwerebeschleunigung und wir werden es für möglich halten, dass nun durch diese mechanischen Eingriffe ernstliche Störungen im Organismus in Form der Seekrankheit auftreten können.

Versuch 2. Die Versuchsweise mit der schwingenden Wage wurde zunächst der Bequemlichkeit und Raumersparniss wegen gewählt. Wollte man ähnliche Versuche auf einer grossen Atwood'schen Fallmaschine anstellen, so wäre hiezu ein bedeutender Raum nöthig. Die Förderungsmaschinen in Bergwerksschachten sind nun ähnliche Vorrichtungen. Herr Professor G. Schmidt vom hiesigen

Polytechnicum theilte mir mit, dass nach seiner Schätzung die Schale, auf welcher er kürzlich in den Schacht eingefahren war, in 10 Secunden eine Geschwindigkeit von 3 Fuss erlangt habe, was also einer Beschleunigung von 0.01 der Schwerebeschleunigung entspricht. Schmidt hat diese Beschleunigung noch deutlich empfunden. Ein anderer bei dieser Mittheilung anwesender Naturforscher bemerkte, er habe sich an die Fallbewegung alsbald »gewöhnt«. Dies kann einen doppelten Sinn haben. Es kann gemeint sein, dass die Bewegung nicht mehr empfunden wird, wenn sie gleichförmig geworden ist oder dass auch die bleibende Beschleunigung schliesslich nicht mehr empfunden wird. Wir werden sehn, dass beides der Fall ist. Eine gleichförmige Bewegung wird nie empfunden, aber auch die Empfindung einer constanten Beschleunigung verschwindet nach und nach.

Versuch 3. Der Wunsch, die zuvor beschriebenen Erscheinungen in grösserer Intensität zu beobachten, führte zu einem andern Versuch. Zunächst wurde eine Fallmaschine construirt, welche als eine Combination der Galilei'schen und Atwood'schen bezeichnet werden kann. Zwei Holzschienen von 22^m Länge und 2^m Fall auf diese Länge waren als schiefe Ebene aufgestellt. Auf den Aussenseiten der Schienen lief ein einfacher Wagen für den Beobachter, auf den Innenseiten ein zweiter niederer Wagen für Gegengewichte unter dem ersten Wagen durch. Beide waren durch eine Schnur, die über eine Rolle am obern Ende der Schienen ging, mit einander verbunden. Das Ganze war mit kaum nennenswerthen Kosten sehr einfach in dem Raume von drei Zimmern durch die Thüren hindurch aufgestellt worden. Die ersten Versuche mit dem Apparate, der jedes Experiment der Atwood'schen Maschine zulässt, lehrten, dass jede Beschleunigung oder Verzögerung von dem eingeschlossenen Beobachter empfunden wurde. Aber auch bei sehr merklichen Beschleunigungen verschwand die Empfindung bei Fortdauer der gleichförmig beschleunigten Bewegung. Eine scheinbare Umkehrung der Bewegung für den eingeschlossenen Beobachter, wenn der Apparat angehalten oder die Bewegung gleichförmig wurde, trat nur in sehr geringem Maasse ein und war von kaum merklicher Dauer. Sehr störend waren bei allen Versuchen die von den Rädern herrührenden Erschütterungen. Da sich die Versuche wenig

ergiebig zeigten, weshalb ich auch auf das Detail nicht eingehe, wurde der Apparat alsbald abgeräumt und durch einen neuen ersetzt.

Versuch 4. Denken wir uns in dem Rahmen R unseres Rotationsapparates horizontale Schienen, auf den Schienen einen Rollstuhl für den Beobachter. Ein Gehilfe, der hinter dem Stuhle in dem Rahmen steht, hat die Aufgabe, denselben während der Rotation, die von einem andern Gehilfen besorgt wird, in Bewegung zu setzen. Rotirt der Apparat (von oben gesehn) im Sinne des Uhrzeigers, so entspricht jeder radialen Verschiebung des Beobachters nach vorn eine Beschleunigung nach rechts; jeder solchen Verschiebung nach hinten eine Beschleunigung nach links. Die Beschleunigung beträgt, wenn in der Zeit t bei der Winkelgeschwindigkeit q die Schienenstrecke a gleichförmig mit dem Rollstuhl durchfahren wird, $\frac{aq}{t}$. Die Beschleunigung verschwindet, wenn die Verschiebung aufhört. Es kommt hier, wie man sieht, dasselbe Princip zur Anwendung, welches zur Erklärung der Passatwinde, Flussabweichungen u. s. w. auf der rotirenden Erde verwendet wird. Man meint nun wirklich, dass bei jeder Vorwärtsbewegung, während man die gleichförmige Rotation längst vergessen hat, der ganze Apparat nach rechts fortfliegt. Das Fortfliegen hält noch an, wenn die Verschiebung schon beendigt ist. Die durch eine momentane Progressivbeschleunigung erregte Empfindung hat also eine merkliche Nachdauer.

Ob die Richtung des Bewegungsnachbildes sich mit einer Kopfwendung ändert, konnte nicht entschieden werden, da es selbst durch eine Axenführung nicht möglich war, den Kopf bloss um eine der Apparat-Rotationsaxe parallele Axe zu drehen. Bei jeder andern Drehung treten aber die subjectiven Analoga der Schwungmaschinenversuche so betäubend auf, dass alles übrige unbemerkt bleibt.

Was diese Versuchsweise betrifft, so muss noch Einiges bemerkt werden. Der ganze Apparat, in welchem die Verschiebung des Beobachters stattfand, war wie überall, wo nicht ausdrücklich das Gegentheil bemerkt wurde, um Gesichtsphänomene zu eliminiren, mit Papier geschlossen. Das Mittel der Rotation wurde angewandt, weil sich mit demselben bei grosser Raumersparniss plötzlich bedeutende Beschleunigungen erzielen lassen.

Auf einer rotirenden Kugel bringt jeder aus einem Breitengrad in den andern verschobene feste Körper nicht nur eine relative Progressivgeschwindigkeit, sondern auch eine relative Winkelgeschwindigkeit mit. Letztere fällt in einer rotirenden Ebene, wie in unserem Experiment, weg. Ich weiss nicht, wie weit dies bei Erklärung der Schienenabweichungen auf Eisenbahnen zu berücksichtigen ist.

Versuch 5. In dem Rahmen R unseres Rotationsapparates wird der Rahmen r sehr leicht um die Axe a drehbar angebracht. Der eingeschlossene Beobachter nimmt auf dem Stuhle in r Platz. Der Rahmen r wird an R zunächst festgebunden und eine rasche gleichförmige Rotation eingeleitet. Wenn der Beobachter letztere nicht mehr fühlt, löst er die Verbindung von R und r und commandirt Halt. Die Progressivbewegung des ausserhalb der Hauptaxe befindlichen Beobachters wird nun plötzlich gehemmt, während die Rotation des Rahmens r nach dem Flächenprincip fortdauert. Sofort meint der Beobachter entgegengesetzt der eben gehemmten Progressivbewegung einige Secunden lang fortzufliegen. Da er sich hiebei dreht, ohne etwas davon zu merken, so dreht sich also die Richtung des Bewegungsnachbildes mit seinem ganzen Körper. Leider kann der Versuch mit der blossen Kopfwendung auch hier nicht überzeugend ausgeführt werden. Man wird übrigens kaum irren, wenn man den Sitz der Empfindung von Progressivbeschleunigungen im Kopfe annimmt. Ich erwähne noch, dass ein solches Bewegungsnachbild durch rasche und geschickte Wiedereinleitung der eben unterbrochenen Bewegung ausgelöscht werden kann. Ich muss annehmen, dass der gleichmässige geräuschlose Gang des Apparates bei dem letzten Versuche besonders zum Gelingen beigetragen hat. Doch war auch die plötzlich aufgehobene Geschwindigkeit bei dem letzten Versuch am grössten. Wahrscheinlich verhalten sich die Empfindungen der Winkel- und der Progressivbeschleunigung durchaus analog.

Es muss zu diesem Versuch noch Folgendes bemerkt werden. Das nach dem Anhalten des Apparates auftretende Gefühl des Fortfliegens nimmt allmälig ab. Einstweilen hat aber der Rahmen r durch die Reibung eine merklich verzögerte Rotation angenommen, welche als Gegendrehung empfunden wird. Dadurch gewinnt es

den Anschein, als ob die subjective Bewegung mit einer Spirale schliessen würde.

Die wirkliche Bewegung des Beobachters in dem letzten Versuch lässt sich auffassen als zusammengesetzt aus einer Progressivbewegung im Kreise (ohne Drehung) und aus einer gleichzeitigen Drehung. Es lässt sich nun die gemachte Beobachtung leicht dahin verallgemeinern, dass alle unbeschleunigten Componenten einer Bewegung für die Empfindung verschwinden.

Versuch 6. Wenn der Beobachter mit dem Gesicht der Rotationsaxe A zugewandt in gleichförmige Rotation versetzt wird, so lässt sich diese Bewegung zusammengesetzt denken aus einer gleichförmigen Seitwärtsbewegung und einer gleichförmig beschleunigten stets nach der Axe hin gerichteten Bewegung. Beim Fortdauern der Bewegung verschwindet nun das Bewegungsgefühl gänzlich. Der Beobachter hat bloss das Gefühl der Rückenlage. Daraus geht hervor, dass auch die constante gegen den Beobachter dieselbe Richtung einhaltende Beschleunigung schliesslich keine Bewegungsempfindung mehr erregt.

7.

Haben die bisher beschriebenen Versuche den Vorzug, dass man bei denselben an sich selbst beobachtet, also die grösstmögliche subjective Sicherheit erzielt, so sind die folgenden dadurch ausgezeichnet, dass man die Ergebnisse derselben mehreren Personen zugleich zeigen kann, wobei freilich die Deutung der Ergebnisse und der Schluss auf die denselben zu Grunde liegenden Empfindungen, auf die es uns hier hauptsächlich ankommt, nicht ganz frei von Willkühr ist.

Viele der beschriebenen Rotationsexperimente habe ich nämlich auch an Thieren angestellt. Schon früher sind Versuche über passive Drehung von Thieren und die dabei auftretenden Verdrehungen und nystagmatischen Bewegungen der Augen und des Kopfes angestellt worden von Graefe (Arch. f. Ophthalm. I.), Czermak (Pflügers Archiv 1873) und Breuer (Jahrb. d. Gesellschaft d. Aerzte 1874). Letzterer hat auch schon darauf aufmerksam gemacht, dass durch Drehung schwindlig gewordene Vögel sich ganz so benehmen, als wären sie an den Bogengängen operirt. Die hier zu beschrei-

benden Versuche sollen zunächst bloss zur Anschauung bringen, dass sich bei den Thieren dieselben Bewegungsempfindungen äussern, welche wir aus der Selbstbeobachtung kennen.

Versuch 1. Auf die Scheibe der Centrifugalmaschine setzen wir eine Taube und über dieselbe einen grossen Glassturz mit Luftloch, der dem Thiere alle Bequemlichkeit gestattet. Drehen wir die Scheibe (von oben gesehn wie den Uhrzeiger, so fängt die Taube an, sich in entgegengesetztem Sinne herumzudrehen. Bei rascherer Drehung der Scheibe hört die Bewegung des Körpers auf und die Taube verdreht bloss den Kopf entgegen dem Uhrzeiger. Sie sucht also durch alle ihre Mittel die ihr aufgedrungene Bewegung zu compensiren. Bei noch grösserer Geschwindigkeit sehn wir, wie sich die Taube gegen die Axe zu neigt und den äussern Flügel, wie um sich zu stützen, gegen die Glassturzwand ausstreckt. Sie hat augenscheinlich die Vorstellung, dass die Lage des Behälters eine schiefe ist. In dieser Stellung verbleibt nun das Thier unbeweglich, so lange als die heftige Rotation dauert. Hält man nach etwa zwei Minuten plötzlich den Apparat an, so beginnt die Taube krampfhafte Bewegungen und Umdrehungen in demselben Sinne, in welchem sie in Rotation versetzt worden war. Benimmt sich also das Thier nach derselben Regel, wie bei Beginn des Experimentes, so hat es die Vorstellung einer gewaltsamen Gegendrehung. Wirft man sofort nach dem Anhalten des Apparates die Taube heraus, so hat man in ihrem Benehmen das getreue Bild einer an den Bogengängen operirten Taube. Sie dreht sich zwar auch noch in demselben Sinne, überkugelt sich aber, wenn sie einmal gefallen ist, nach den verschiedensten Richtungen. Ihre Beine knicken ein, sie kann nicht fliegen und fällt häufig wie ein Stein vom Tische. Auch das bekannte Aufstützen des Kopfes kann man beobachten. Ein junges Kaninchen benahm sich ebenso wie eine Taube. Ich habe an demselben auch die von Breuer beschriebenen Zuckungen des Kopfes beobachtet.

Versuch 2. Der vorige Versuch ist nicht ganz rein. Die Bewegungen der frei gegebenen Taube hängen nicht nur von der Kopfstellung während der gewaltsamen Rotation, sondern auch von den Kopfstellungen, welche das Thier nachher bei seinen Bewegungen annimmt, ab. Denn die Scheindrehung dauert nach, ihre Axe

sitzt im Kopfe fest und bewegt sich mit demselben. Die anfängliche Kopfstellung während der gewaltsamen Rotation lässt sich nun gut fixiren. Wir construiren uns für das Kaninchen eine Art Sarg in Form eines vierseitigen Pyramidenstutzes. Drei der sechs Brettchen, aus welchen der Sarg besteht, sind verlängert, so dass sie zum Anschrauben des kleinen Apparates auf die Scheibe der Centrifugalmaschine benützt werden können. Das eine Seitenbrettchen *D* ist in Bändern beweglich und wird mit Hilfe eines Hakens geschlossen, so dass man es rasch öffnen kann. Der Kopf des Kaninchens kommt nun in den engern Raum nach *O*, so dass die Bauchseite des Thieres gegen *A* hinsieht. Der Raum um den Kopf wird gut mit Watte ausgestopft, so dass die Kopfstellung nicht mehr geändert werden kann.

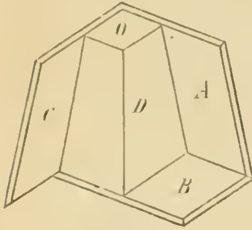


Fig. 8.

Schrauben wir zuerst *A* auf die Scheibe der Centrifugalmaschine und werfen nach einer Rotation im Sinne des Uhrzeigers das Thier rasch aus dem Kästchen, so dreht es sich krampfhaft im Sinne des Uhrzeigers, indem es auf den Vorderbeinen ruhend mit den Hinterbeinen umherhüpft. Der Kopf des Thieres ist im Sinne des Uhrzeigers verdreht und macht die von Breuer an Vögeln beobachteten Bewegungen. Aus Allem geht hervor, dass das Thier meint, verkehrt wie der Uhrzeiger gedreht zu werden.

Wir schrauben nun *B* auf die Scheibe der Centrifugalmaschine. Das Thier wird also jetzt um die Längsaxe des Körpers und Kopfes in Rotation versetzt. Nach beendigter Drehung rasch auf den Tisch herausgeworfen, wälzt sich das Thier einige Secunden lang beharrlich um die Längsaxe und zwar in demselben Sinne, in welchem es gedreht wurde.

Schrauben wir *C* auf die Scheibe der Centrifugalmaschine, so dass die Rotation um eine von rechts nach links durch den Kopf hindurchgehende Axe ausgeführt wird, so werden wir nach den früheren Erfahrungen erwarten, dass das freigelassene Thier Purzelbäume ausführen wird, indem es nach vorne oder hinten je nach dem Rotationssinne überschlägt. An meinem Versuchsthier, welches jedoch noch jung und wahrscheinlich nicht genug muskelkräftig

war, habe ich nur unvollkommene Versuche dieser Bewegung gesehn. Ich zweifle jedoch nicht, dass ein kräftiges Thier diese Erscheinung rein zeigen wird.

Für mich haben nun zwar die an mir selbst angestellten Beobachtungen einen viel grösseren subjectiven Werth. Die eben beschriebenen Versuche eignen sich aber vorzüglich zu Collegiendemonstrationen.

8.

Alle bisher beschriebenen Versuche behandeln die Erscheinungen an passiv bewegten Menschen und Thieren. Auf Versuche über active Bewegungen und deren Empfindung habe ich aus mehreren Gründen ein geringeres Gewicht gelegt. Die Muskelanstrengungen bei der activen Bewegung führen an sich schon Empfindungen mit sich und können Nachempfindungen veranlassen, welche die eigentlichen Bewegungsempfindungen zu überdecken und zu stören vermögen. Solche Versuche sind daher für unsern Zweck weniger rein. Ferner löst jede stärkere Gleichgewichtsstörung reflectorisch zweckmässige Bewegungen zur Erhaltung des Gleichgewichtes aus, wie wir dies sehr schön an gedrehten Thieren sehen können. Solche Bewegungen treten nun auch bei den Scheinbewegungen auf und werden dann, wenn sie auch den Beobachter nicht gerade niederwerfen, als in diesem Fall unzweckmässige Bewegungen doch mehr oder weniger starke Gleichgewichtsstörungen hervorbringen, welche die zu beobachtenden Empfindungen compliciren. Am reinsten fallen die Versuche aus, wenn man bei durchaus unterstütztem Körper passiv bewegt wird, wobei jene Bewegungstendenzen schon sehr viel schwächer auftreten, und wo sie vorhanden sind, keinen sichtbaren Erfolg haben, so dass sie in der Regel gar nicht bemerkt werden. Aus diesen Gründen und weil ich mich auf rein Physiologisches nicht einlassen wollte, habe ich mich fast darauf beschränkt, gelegentlich die schon von Purkyně angestellten Versuche zu wiederholen. Hierüber mag hier das Nothwendigste in aller Kürze folgen.

Wenn man sich in verticaler Stellung um die Längsaxe des Körpers mehreremal umdreht, so beginnen die sichtbaren Gegenstände, welche anfangs ruhend erscheinen, bald eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung. Bleibt man nach längerer Drehung

plötzlich stehen, so setzen die sichtbaren Gegenstände ihre Bewegung fort, aber auch jeder tastbare Gegenstand, den man anfasst, so wie überhaupt unser Körper mit seinem ganzen Inhalt scheint sich in einem der ausgeführten activen Drehung entgegengesetztem Sinne zu drehen. Dies sind die Phänomene des Gesichts- und des Tastschwindels. Die Axen der scheinbaren Drehung sind sowohl für den Gesichts- als für den Tastschwindel bestimmt durch jene Axe, um welche der Kopf gedreht wurde, wie Darwin und Purkyně schon wussten. Nach Beendigung der activen Rotation behält die Axe der Scheinbewegung ihre Lage im Kopfe bei und macht jede Bewegung des Kopfes mit.

Purkyně scheint nun anzunehmen, dass die längere Zeit ausgeführte Bewegung der Muskel und der Augen, welche erstere durch das Bestreben sich zu drehen, letztere durch das Bestreben zu fixiren, bedingt ist, längere Zeit auch nach dem Stehenbleiben »bewusstlos« fortgesetzt wird. Indem der Effect dieser bewusstlosen Bewegungen den Objecten zugeschrieben wird, entstehn die Schwindelbewegungen.

Breuer hat eine andere Auffassung der Sache. Er nimmt an, dass die bewusstlosen Bewegungen reflectorisch durch die Bewegungsempfindungen erregt werden, welche sowohl beim Beginn, wie beim Ende der Drehung auftreten. Auch bei Purkyně taucht flüchtig die Annahme auf, dass die Bewegung direct auf's Hirn wirkt und von hier aus die unbewussten Bewegungen erregt werden. In der That lassen sich die bei den Versuchen auftretenden Augenbewegungen, von welchen wir später noch sprechen werden, wohl nur nach der Breuer'schen Auffassung verstehn.

Die Purkyně'sche ersterwähnte Auffassung wird sich nicht ganz bestreiten lassen, wenn man nicht die Macht der Gewohnheit überhaupt bestreiten will. Doch ist die Annahme von Reflexbewegungen nicht gar so verschieden von dieser Auffassung. Die Reflexbewegungen werden sich immer ansehn lassen als hervorgerufen durch Gewohnheit, wenn auch durch eine Gewohnheit von viel älterem und grösserem (über das Individuum hinausreichendem) historischen Recht. Ich muss mich aus Gründen, welche vorzubringen die Gelegenheit nicht fehlen wird, der Breuer'schen Auffassung anschliessen.

Der Flourens'sche Versuch.

1.

Einige der Flourens'schen Versuche sind von Herrn Dr. Kessel in meinem Laboratorium wiederholt worden. Ich kenne also die Erscheinungen so weit aus eigener Anschauung, um die grosse Aehnlichkeit derselben mit den an gedrehten Thieren beobachteten zu constatiren. Doch muss ich mich, da ich nie selbst Vivisectionen ausgeführt habe, in diesem Capitel darauf beschränken, das für uns Wichtigste aus den Arbeiten anderer zu referiren.

Flourens hat bei Gelegenheit einer Untersuchung über die Bedingungen der Hörfähigkeit nach einander alle Theile des Gehörorganes zerstört. Er hat gefunden, dass die Hörfähigkeit einer Taube wenig beeinträchtigt wird durch Abtragung des Trommelfells und der Gehörknöchelchen, sehr merklich hingegen durch Entfernung des Steigbügels. Blosslegung des Vorhofs und selbst Zerstörung der Nerven desselben vernichtet das Gehör nicht vollständig. Absolute Taubheit tritt nur bei Vernichtung der Schneckennerven ein. Vorhof und Schnecke scheinen gegen Schmerz unempfindlich, wogegen sich die Bogengänge sehr empfindlich erweisen. Das Gehör scheint durch Eingriffe in die Bogengänge nicht afficirt zu werden. Dagegen fand sich Flourens sehr überrascht durch die auffallenden Bewegungen der Thiere bei Durchschneidung der Bogengänge.

Jedesmal wenn der Inhalt eines horizontalen Bogenganges durchschnitten oder mit einer Nadel gestochen wird, scheint das Thier lebhaften Schmerz zu empfinden und es treten heftige Bewegungen des Kopfes in horizontaler Richtung von rechts nach links und von links nach rechts auf. Diese Pendelbewegung des Kopfes beruhigt sich oft, tritt aber bei jedem Bewegungsversuch des Thieres von neuem auf. Fing das Thier an zu gehn, so wurden seine Bewegungen immer ungeordneter, bis es endlich ganz dem Schwindel unterlag. Zuweilen treten auch spontane Drehbewegungen des Thieres um die verticale Axe auf.

. . . . »dès que l'animal commençait à marcher, la tête recommençait à s'agiter; et cette agitation de la tête s'accroissant avec les mouvements du corps, toute démarche, tout mouvement régulier,

finissaient par devenir impossibles, à peu près comme on perd l'equilibre et la stabilité de ses mouvements quand on tourne quelque temps sur soi-même, ou qu'on secoue violement la tête«*. Man sieht, wie hart Flourens an unserer Auffassung vorbeigeht.

Da eine Aehnlichkeit dieser Erscheinungen mit denjenigen, welche Flourens nach gewissen Kleinhirnverletzungen erhalten hatte, unverkennbar war, so untersuchte er sehr genau, ob solche Verletzungen eingetreten waren. Der Wichtigkeit dieses Punktes wegen will ich die darauf bezüglichen Worte anführen**).

»La rassemblance frappante de cette dernière partie du phénomène avec les phénomènes qui suivent les lésions du cervelet pouvait faire croire à quelque lésion, sinon directe, du moins indirecte de cet organe. J'examinai donc le cervelet avec le plus grand soin; il parut dans un état d'integrité parfaite.

Pour établir, avec plus de précision encore, l'indépendance du phénomène que je décris de toute lésion, du moins directe, soit du cervelet, soit de toute autre partie de l'encéphale, j'eus recours aux précautions suivantes. Je mis bien exactement à nu les canaux semicirculaires sur un pigeon; puis je coupai le canal horizontal des deux côtés.

Je choisis ce canal pour sujet de mon expérience, parce qu'il est le plus éloigné de l'encéphale, surtout du cervelet; et en le coupant je mis toute mon attention à éviter la moindre secousse qui eût pu se communiquer aux parois du crâne.

Malgré ces précautions, la section des deux canaux fut suivie du branlement impétueux de la tête.

Quand ce branlement s'arrêtait, on pouvait toujours le reproduire, soit en piquant avec la pointe d'une aiguille les parois internes des canaux, soit en excitant l'animal à se mouvoir.

Le branlement était toujours plus vif au moment où il commençait; puis il allait en se ralentissent, et finissait peu à peu par cesser tout-à-fait. Mais les choses ne se passaient ainsi qu'autant que l'animal restait en repos; quand il marchait, au contraire, le

* Recherches. 2e édition. p. 446.

** p. 447.

branlement était toujours d'autant plus vif que l'animal cherchait à marcher plus vite.

J'avais constaté l'absence de toute lésion ou plutôt de toute blessure directe du cervelet; mais il restait une cause particulière de lésion à examiner encore.

En rompant avec des ciseaux, comme je l'avais fait jusqu'ici, les canaux semi-circulaires, on rompt inévitablement la petite artère qui rampe sur leur côté externe; et cette rupture amène bientôt un épanchement de sang qui gagne rapidement le cervelet, la moelle allongée et toute la cellulosité osseusse des parois postérieures du crâne. Il importait donc d'éviter la complication qui pouvait résulter de cet épanchement.

A cet effet, les canaux semi-circulaires étant mis à nu sur un pigeon, j'ouvris l'un de ces canaux, l'horizontal, par le côté opposé à celui qu'occupe l'artère, et sans ouvrir l'artère par consequent.

Tout épanchement étant évité ainsi, je piquai les parties internes de ce canal; la douleur et l'agitation de la tête suivirent aussitôt, et de la même manière que dans les expériences precédents; á cela près, nèanmoins, que l'agitation fut bien moindre dans ce cas que dans le cas de la rupture complète du canal.»

Die beschriebenen Folgen der Operation erhielten sich nun an einer am 15. November 1824 operirten Taube bis zum 17. Mai 1825. Jedesmal wenn das Thier zu Bewegungen gereizt wurde, zeigten sich die Pendelbewegungen des Kopfes und die Drehungen. Das Thier wurde getödtet und die Untersuchung des Gehirns erwies dasselbe als vollkommen unversehrt. Man sieht hieraus, dass Flourens sorgfältig experimentirt und beobachtet hat.

Durchschneidung der Horizontalcanäle (beiderseits) bringt heftige horizontale Hin- und Herbewegungen des Kopfes hervor. Mit diesen Kopfbewegungen gingen auch stets starke Augenbewegungen Hand in Hand.

Wurden beiderseits die untern verticalen Canäle durchschnitten, so traten die Kopfbewegungen auf- und abwärts ein, wobei der Kopf oft nach der einen oder andern Seite sich neigte. Das Flugvermögen ist verloren, die Augenbewegung wie in dem frühern Falle heftig. Das Thier überkugelt sich häufig, indem es auf den Rücken fällt.

Nach Durchschneidung der beiden obern verticalen Canäle erscheinen heftige Kopfbewegungen auf und ab und die Taube überkugelt häufig nach vorn.

Blosses Aufbrechen der knöchernen Canäle hat keine Wirkung. Erst wenn man die häutigen Canäle mit einer Nadel sticht, treten die Bewegungen ein, wiewohl schwächer als bei Durchschneidung der Bogengänge.

»Dans plus de vingt expériences sur ces canaux, je me suis constamment convaincu de l'integrité complète et absolue du cervelet« *).

Auch an Kaninchen hat Flourens experimentirt. Durchschneidung des linken horizontalen Bogenganges brachte Bewegungen des Kopfes von rechts nach links und umgekehrt hervor, die sich bei jeder Aufreizung zur Bewegung wiederholten. Hiebei immer heftige Augenbewegungen. In der Ruhe ist der Kopf nach links verdreht. Das Thier dreht sich häufig um die Verticalaxe nach links. Wird die Operation auch auf der andern Seite ausgeführt, so tritt die Drehung bald nach rechts, bald nach links ein. In der Ruhe ist dann die Kopfstellung normal. Die Operation auf der rechten Seite allein bringt Rechtsdrehung hervor.

Durchschneiden der beiden hintern Verticalcanäle bringt Ueberschlagen nach hinten hervor. Durchschneiden der vordern Verticalcanäle gibt Ueberschlagen nach vorn.

Der Umstand, dass die Bogengänge durchschnitten werden können, ohne eine merkliche Gehörsstörung hervorzubringen, legt die Vermuthung nahe, dass die betreffenden Nerven mit dem Hören nichts zu thun haben. Ob die Reizung dieser Nerven Schmerz verursacht, lässt sich nach den Angaben von Flourens schwer entscheiden, da er nicht angibt, wodurch die Thiere den Schmerz äussern. Die heftigen Bewegungen und das Sträuben können ganz andere Ursachen haben. Sind Schmerzen vorhanden, so können diese auch von andern Nerven herrühren als denjenigen, welche die Bewegungserscheinungen anregen. Die natürlichste Annahme ist die, dass diese Nerven vermöge ihrer specifischen Energie gereizt Bewegungsempfindungen erregen. Wir sehen auch, dass Flourens,

* p. 166.

obwohl er hierauf nicht eingeht und sogar eher an schmerzhaft erhöhte Empfindlichkeit des Gehörs denkt, kein besseres Bild zur Beschreibung der Erscheinungen findet, als den Drehschwindel.

2.

Die Versuche von Flourens sind in allen wichtigen Punkten von Harless, Czermak, Brown-Sequard und Vulpian bestätigt worden. Brown-Sequard hat bei Säugethieren und Fröschen mit durchschnittenem Hörnerv Roll- und Drehbewegungen beobachtet, die Schiff bestritten, Goltz aber wieder bemerkt hat.

Vulpian nimmt zur Erklärung der Erscheinungen eine heftige Erregung der Gehörnerven an, die erschreckend auf das Thier wirkt. Brown-Sequard und später Löwenberg haben ebenfalls an Reizung des Gehörnerven gedacht, welche dann reflectorisch die sonderbaren Bewegungen auslöst.

Goltz hat eine wesentlich neue Auffassung der Flourens'schen Phänomene gefunden, indem er, gestützt auf seine Versuche an Fröschen mit durchschnittenen Gehörnerven und auf mehrere sinnreiche Abänderungen der Flourens'schen Versuche den Satz ausspricht: »Ob die Bogengänge Gehörorgane sind, bleibt dahingestellt. Ausserdem aber bilden sie eine Vorrichtung, welche der Erhaltung des Gleichgewichts dient. Sie sind so zu sagen Sinnesorgane für das Gleichgewicht des Kopfes und mittelbar des ganzen Körpers.« Wie man sieht, ist dies diejenige Vorstellung, welche auch ich mit einigen Modificationen glaube festhalten zu müssen und auf die ich durch ganz andere Experimente und Ueberlegungen geführt worden bin.

Goltz entwickelt nun eine etwas detaillirtere Vorstellung von der Wirkungsweise dieses Gleichgewichtsorgans in folgenden Worten: »Ich habe mir folgende Einrichtung als möglich gedacht. Wir wollen annehmen, dass die in den Ampullen vorhandenen Nervenendigungen in ähnlicher Weise geeignet sind, durch Druck oder Dehnung erregt zu werden, wie etwa die dem Drucksinne dienenden Nerven der äussern Haut. Die in den Bogengängen befindliche Flüssigkeit (Endolymphe) wird nach bekannten physikalischen Gesetzen diejenigen Abschnitte der Wandung am stärksten anspannen, welche am meisten nach abwärts gelegen sind. Je nach der Stel-

lung des Kopfes wird die Vertheilung des Druckes der Flüssigkeit wechseln, und einer jeden Kopfhaltung wird demgemäss immer eine bestimmte Form der Nervenerregung entsprechen.«

3.

Wir haben nun noch einiger Arbeiten zu erwähnen, welche sich die Kritik des Flourens'schen Versuches und der daran geknüpften Theorieen zur Aufgabe gemacht haben. Schklarewsky weist auf einen zwischen den Bogengängen befindlichen Kleinhirnfortsatz hin, der bei dem Flourens'schen Versuch sehr leicht mit verletzt werden und die beobachteten Erscheinungen bedingen kann. Letzteren Kleinhirnfortsatz erklärt Böttcher gestützt auf seine und Hasse's*) anatomische Untersuchungen für den aquaeductus vestibuli. Die Anschauungen, zu welchen Cyon in seiner Arbeit gelangt, setzen sich aus jenen von Goltz und aus älteren Vorstellungen zusammen.

Cyon schliesst aus seinen Versuchen, dass die Bogengänge Raumorgane seien, welche uns „unbewusste Empfindungen“ liefern, aus welchen wir »unbewusste Schlüsse« über die Kopfstellung ziehn. Cyon hält die Störungen bei Durchschneidung der Bogengänge für Folgen anomaler Gehörsempfindungen. Letzteres wird man sehr unwahrscheinlich finden, wenn man bedenkt, dass die beim Drehschwindel auftretenden ganz ähnlichen Phänomene keineswegs von Gehörsempfindungen begleitet sind.

Curschmann findet auf Grund zahlreicher sorgfältig angestellter Versuche an Tauben, dass alle bis dahin aufgestellten Theorieen der Flourens'schen Erscheinungen, namentlich die Auffassung der Canäle als Sinnesorgane, unhaltbar seien. Er hält die Phänomene nicht für Folgen eines Reizes, sondern für Folgen eines Functionsausfalles, ohne jedoch selbst eine umfassende Theorie geben zu können.

Diejenige Arbeit, welche sowohl durch die Zahl der Versuche als auch durch die Entschiedenheit der Sprache am meisten imponiren möchte, indem sie so ziemlich Alles in Abrede stellt, was bisher über den Flourens'schen Versuch als richtig angenommen wurde, ist die von Böttcher. Ich will diejenigen Sätze, die Bött-

*) Hasse, anatomische Studien. 4. Heft. S. 765.

cher selbst für wichtig erkennt, herausheben. Unter den Bewegungsstörungen wird zuerst besprochen:

»1. Die einseitige Verdrehung des Kopfes und die damit verknüpfte Senkung desselben auf den Boden, so dass der Scheitel den Boden berührt und der Schnabel mehr oder weniger nach hinten gerichtet erscheint.« — »Diese Störung kann durch einseitige Operation erzeugt werden, wenn der Eingriff ein tiefer ist«. . . . — »Dagegen zeigt sich die Kopfverdrehung niemals, wenn mit Vorsicht operirt wird.« Es wird ferner bemerkt, »dass die Kopfverdrehung sich häufig erst in der Folge entwickelt«. In der Mehrzahl dieser Fälle hat Böttcher »Veränderungen in der Schädelhöhle feststellen können, die mit den vorhergegangenen Krankheitserscheinungen in directe Beziehung gebracht werden müssen«. Auch wird erwähnt, »dass die Kopfverdrehung sich öfters ganz plötzlich entwickelt«.

»2. Die Reitbahnbewegungen und die Bewegungen nach vorn und hinten um die Querachse« — »Ich habe nachgewiesen, dass nach Durchschneidung des Bogenapparates auf beiden Seiten die Anfangs auftretenden Bewegungsstörungen gänzlich schwinden können.« — »Wäre der Verlust der Bogengänge und ein dadurch verursachter Schwindel die Ursache obengenannter Bewegungsstörungen, so hätten diese andauern müssen.« — »Als ferneres Ergebniss meiner Untersuchung darf ich die Thatsache hervor heben, dass die Bewegungsstörung immer an den Extremitäten der Seite sich geltend macht, auf welcher die Durchschneidung des Bogenapparates vorgenommen wurde.« — »Weiterhin habe ich geltend zu machen, dass die in Rede stehenden Bewegungsstörungen zwar bald beim Gange und Fluge zugleich vorhanden sind, bald aber auch nur beim Gange oder nur beim Fluge beobachtet werden.« — »Wenn nun einerseits durch den operativen Eingriff nur das Gehvermögen und anderseits nur das Flugvermögen leidet, so kann diese Störung nicht von einem Schwindel abhängen, weil ein solcher die Bewegungen beim Gange und Fluge in ganz gleicher Weise beeinträchtigen müsste.« — »Endlich ist noch darauf aufmerksam zu machen, dass die Art der Bewegungsstörungen nicht nur davon abhängt, welche Bogengänge, sondern auch davon, wo diese durchschnitten werden.«

»3. Die Pendelbewegungen des Kopfes können eine vorübergehende Erscheinung sein.« — »Die Pendelbewegungen sind in an-

dern Fällen bleibend bei unausgesetzt gerader Kopfhaltung.« — »Wenn eine Kopfverdrehung sich einstellt, hören die Pendelbewegungen meist auf.»

Ueber die Goltz'sche Theorie bemerkt Böttcher:

»Wenn die Hypothese desselben richtig wäre, so müssten nach Durchschneidung des Bogenapparates auf beiden Seiten in jedem Fall bleibende Gleichgewichtsstörungen vorhanden sein.« — »Trotz unveränderter Kopfstellung kommen nun aber doch Bewegungsstörungen des Rumpfs vor.« — »Die Gleichgewichtsstörungen des Rumpfs können aber nicht aus Gleichgewichtsstörungen des Kopfs abgeleitet werden.« — »Die Gleichgewichtsstörungen des Rumpfs können sich vollständig verlieren.« — »Es kann also die Continuität der Bogengänge, und zwar gleichnamiger Bogengänge, auf beiden Seiten unterbrochen sein und braucht darum dennoch keine Gleichgewichtsstörung des Rumpfs zu bestehen.« — »Wenn ein Schwindel, wie Goltz annimmt, die Ursache der Reitbahnbewegungen und der Drehungen um die Querachse wäre, so müsste sich diese Störung beim Gebrauch der Flügel und der Beine stets in gleicher Weise äussern.« — Von der Kopfverdrehung sagt Böttcher: »Sie ist demnach weder eine unmittelbare Folge der Bogengangdurchschneidung noch auch kann sie die Ursache der Bewegungsstörungen des Rumpfs sein.«

Die Reitbahnbewegungen und die Pendelbewegungen hängen nach Böttcher mit der Durchschneidung der Bogengänge selbst zusammen, und zwar steht, was die Reitbahnbewegungen betrifft, der Erfolg der Operation in geradem Verhältnisse zu der Zerrung, welche auf die häutigen Bogengänge ausgeübt wird. Durch diese Zerrung werden, wie Böttcher glaubt, Veränderungen im Hirn hervorgebracht, welche die Ursachen der Bewegungserscheinungen sind. Auch die Pendelbewegungen schiebt Böttcher auf eine Mitleidenschaft des Centralorgans, indem er meint andere Erklärungen ausschliessen zu können.

Wie wir also sehn, spielen bei Böttcher Hirnverletzungen, welche Flourens in Abrede stellt, die Hauptrolle. Störungen im Hirn hat Böttcher als wahrscheinliche Ursache der Kopfverdrehung aufgewiesen. Dass solche Störungen auch Ursache der für uns wichtigen Drehungen und Pendelbewegungen seien, ist wie man aus seiner

Abhandlung ersehn kann, eine blosse Vermuthung. Auch sonst sind seine Deductionen nicht frei von Willkührlichkeit. Es ist schwer einzusehn, warum bleibende Gleichgewichtsstörungen nach der Bogengangoperation eintreten müssten wenn die Goltz'sche Theorie richtig wäre. Können denn nicht die Nervenendapparate in einem Falle ihre Empfindlichkeit behalten, im andern dieselbe einbüssen, so dass im letzteren Falle auch die von Reizungen herrührenden Störungen verschwinden? Treten denn die Bewegungsstörungen überhaupt so regelmässig und maschinenmässig auf, dass es überraschen muss, sie einmal mehr im Gange, ein anderes mal mehr im Fluge entwickelt zu sehn? Was das fortwährende Leugnen des Schwindels nach der Bogengangoperation betrifft, so möchte ich den Leser bitten eine Taube oder ein Kaninchen auf der Centrifugalmaschine in Rotation zu versetzen. Das Experiment ist leicht ausgeführt und spricht deutlich.

Sind die Ampullennerven bestimmt, auf mechanische Reize zu reagiren, so ist es ganz selbstverständlich, dass der Erfolg der Operation im geraden Verhältnisse zur Zerrung der Bogengänge stehn wird. Natürlich würden auch die Ampullennerven nicht gereizt, wenn man die Bogengänge ganz ohne mechanische Wirkung auf erstere durchschneiden könnte. Wenn von mechanischen Ampullenreizungen Störungen im Hirn schwer zu trennen sind, so ist anzuerkennen, dass das Experiment unrein ist. Willkührlich aber ist es, von den beiden Eingriffen, Zug am Nerv und Fortpflanzung dieses Zuges ins Hirn, bloss den letzteren als wirksam zu betrachten. Wird einmal zugegeben, dass Pendel- und Drehbewegungen mit der Durchschneidung der Bogengänge selbst zusammenhängen, so scheint mir auch nach der Böttcher'schen Arbeit die natürlichste Ansicht noch immer die von mir aufgestellte, dass die Ampullennerven vermöge ihrer specifischen Energie jeden Reiz mit einer Drehempfindung beantworten.

Was die Bemerkung Böttchers über meine Abhandlung betrifft, dass ich mit dem Gleichgewichtsorgan wie mit einer gegebenen Grösse operire und es demnach keinen Zweck hätte den daran geknüpften Betrachtungen zu folgen, so habe ich dagegen nur Folgendes zu bemerken. Er scheint hiebei nicht beachtet zu haben, dass Vivisectionen weder das einzige noch das beste Mittel sind, physiologische Thatsachen kennen zu lernen oder deren Theorieen zu

prüfen. Sonst würde er bemerkt haben, dass meine Arbeit grösstentheils Versuche enthält, welche für sich schon einen gewissen Werth behalten, auch wenn der Flourens'sche Versuch gar nicht existirt, und die zu einer allgemeinen Theorie führen, an welcher die Hauptsache durch das Aufgeben des Gleichgewichtsorgans in den Halbcirkelcanälen gar nicht afficirt wird. Doch sprechen diese Versuche für das Gleichgewichtsorgan und werden daher auch für die Beurtheilung des Flourens'schen Experimentes nicht so gleichgültig sein, als Herr Böttcher meint.

Mit der Böttcher'schen Arbeit gleichzeitig erschien eine Abhandlung von Berthold, welche sehr sorgfältig angestellte Experimente enthält. Berthold hat die Flourens'schen Erscheinungen beobachtet, indem er nach aufgebrochenen knöchernen Bogengängen die häutigen mit Hilfe einer Fadenschlinge durchschnitten hat. Beim Gehen der Thiere beobachtet man schon vor der Durchschneidung ab und zu ein Einknicken der Beine auf der operirten Seite. Der Schluss zu dem Berthold kommt, ist folgender: »Die Bogengänge haben sonach die Function, die Coordination der Bewegungen auf dem Wege des Reflexes zu vermitteln. Sie leisten diese Arbeit in Verbindung mit zwei Sinnesorganen, mit dem Gesichts- und dem Gefühlssinn. Ob die Bogengänge zum Hören dienen, ist bis jetzt nicht festgestellt.«

Aus der Literatur des Gegenstandes, an welche ich mich hauptsächlich halten muss, da ich die hieher gehörigen Versuche nicht nachmachen kann, geht hervor, dass in Betreff der Hauptsache, des Zusammenhangs der Pendel- und Drehbewegungen mit der Durchschneidung der Bogengänge unter den Forschern grosse Uebereinstimmung herrscht. Andere Umstände des Versuches, dessen Ausführung überhaupt sehr viel Aufmerksamkeit erfordert, variiren ausserordentlich und damit auch die Deutung der Erscheinungen. Auf jene Hauptsache allein, deren natürlichste Deutung ich versucht habe und auf welche auch Breuer und Brown verfallen sind, auf diese allein kommt es mir an. Ich glaube mich demnach auch nach der Böttcher'schen Arbeit noch berechtigt, meine Hypothese festzuhalten. Als Beweis ist bei dem Zustand des Capitels, der sich in der Nichtübereinstimmung der Forscher in allem Theoretischen selbst nach 50jährigem Experimentiren ausspricht, der Flourens'sche Versuch nicht zu gebrauchen, wohl aber als Fingerzeig.

Erscheinungen, welche an den Flourens'schen Versuch erinnern.

1.

Es sind pathologische Fälle bekannt geworden, welche lebhaft an die Erscheinungen des Flourens'schen Versuches erinnern. Menière hat die eigenthümlichen Formen von Schwerhörigkeit mit Ohrensausen, Erbrechen, Schwindel und Drehbewegungen studirt und als Ursache derselben Exsudat in den Bogengängen nachgewiesen*). Solche Phänomene sind auch bei Thieren beobachtet worden.

In neuester Zeit hat auch Sigm. Exner über eine von ihm beobachtete, bei Kaninchen auftretende Krankheit berichtet, welche ein Analogon der Menière'schen Krankheit bildet.

»Die Erscheinungen dieser Krankheit und die Sectionsbefunde werden benützt, um nachzuweisen, dass Krankheitserscheinungen, wie diejenigen sind, welche man an Thieren mit verletzten Bogengängen beobachtet, auch vorhanden sein können, ohne Affection des Kleinhirns. Es geschieht dies mit Bezug auf die in jüngster Zeit aufgestellten Vermuthungen, dass die Schwindelerscheinungen, welche nach Flourens operirte Thiere zeigen, von Kleinhirnverletzungen herrühren**).«

Zwei Fälle von Pendelbewegung des Kopfes bei Menschen hat auch Berthold in seiner früher erwähnten Arbeit publicirt. Da diesen Beobachtungen aber keine Sectionsbefunde beiliegen, so lassen sich aus denselben auch keine Schlüsse ziehn.

2.

Aehnliche Erscheinungen wie beim Flourens'schen Versuch scheinen also wirklich mitunter durch blosse Bogengangerkrankungen bedingt zu sein. Dies ist für uns wichtig. Sind aber die Bogengänge Endorgane, so dürfen wir uns nicht wundern, dass dieselben oder ähnliche Phänomene auch noch durch Affection der Centralorgane selbst erregt werden können. Hieher gehört wahrscheinlich der von Brücke***) erwähnte Fall einer Kranken bei Türk, welche das

*) v. Tröltsch, Ohrenheilkunde. 5. Aufl. 1873. S. 489.

**) Anzeiger d. Wiener Akademie. 1871. No 20.

***) Physiologie S. 59.

Gefühl hatte, als ob das Bett aufgehoben und umgedreht würde und die sich mit Angst nach der entgegengesetzten Seite wältzte. Dass Kranke bei Kleinhirndegenerationen meinen, sich constant vor- oder rückwärts bewegen zu müssen, um nicht zu fallen, führt Brücke ebenfalls an.

Die Manègebewegungen der Thiere nach Verletzung der Sehhügel (Wundt, physiologische Psychologie S. 169), sowie das Vor- und Rückwärtsfallen derselben nach Durchschneidung der vorderen oder hinteren Gegend des Wurmes (Wundt a. a. O. S. 207), endlich die von Magendie, Schiff und Mitschell beobachtete rastlose Vorwärtsbewegung nach Verletzung der Streifenhügel (Henle Nervenlehre 1871. S. 304), gegen deren Auffassung freilich Bedenken laut geworden sind, alle diese Erscheinungen sprechen dafür, dass Bewegungsgefühle verschiedener Art auch direct in den Centralorganen erregt werden können.

3.

Schon Ritter* und später Purkynè haben den electrischen Strom von Ohr zu Ohr durchgeleitet. Letzterer meinte dabei sich vom Zinkpol gegen den Kupferpol zu bewegen. Ich habe den Versuch mit einer Smee'schen Batterie von sechs Elementen (hintereinander) wiederholt und vollständig bestätigt gefunden. Ich glaubte mich vom Zink zum Platin zu bewegen.

Die Purkynè'schen Versuche sind von Hitzig in sehr sorgfältiger Weise wiederholt worden**). Wie Hitzig beobachtet hat, empfindet man, wenn ein Strom (am besten von einer Fossa mastoïdea zur andern) quer durch den Kopf geht, bei Kettenschluss ein Umsinken des Kopfes oder Körpers nach der Kathodenseite hin. Bei stärkern Strömen äussert sich diese Empfindung auch objectiv, indem die Versuchsperson bei Kettenschluss nach der Anodenseite hinschwankt. Der Selbstbeobachtung fähige Personen bezeichnen diese Bewegung als eine willkührliche, die hervorgerufen wird durch die Empfindung des Umsinkens und durch das Bestreben im Gleich-

* Hufelands Journal für praktische Heilkunde. Bd. 17. Heft 3. S. 34, 72.

**) Ueber die beim Galvanisiren des Kopfes entstehenden Störungen der Muskelinnervation und der Vorstellungen vom Verhalten im Raume, Dubois Archiv 1871.

gewicht zu bleiben. Sind die Augen offen, so treten Scheinbewegungen der Gesichtsobjecte auf, welche nach Hitzig Folgen der bei stärkeren Strömen sich einstellenden unwillkührlichen Augenbewegungen sind.

Hitzig erklärt diese Erscheinungen aus unsymmetrischen Affectionen des Kleinhirns durch den Strom. Breuer und ich haben zunächst an eine Reizung des Labyrinths gedacht. Wie ich glaube, hält Breuer diese Ansicht noch fest.

Die Annahme einer Labyrinthaffection bietet mir aber Schwierigkeiten, wenn ich bedenke, wie geringe Variationen in der Empfindung bei bedeutender Versetzung der Electroden auftreten. Ich habe ohne merklichen Erfolg versucht, beide Electroden dem einen Labyrinth so nahe zu bringen, dass die durchs Hirn gehenden Stromschleifen sehr abgeschwächt werden. Ich bin nicht in der Lage zu sagen, dass hiebei das Kleinhirn nicht mitspielt oder vielleicht sogar allein die Erscheinungen bedingt. Der Versuch ist überhaupt zu complicirt, um für unsern Zweck verwerthbar zu sein.

Ich erlaube mir hier noch ein Experiment zu beschreiben, welches zu dem Hitzig'schen in naher Beziehung steht. Vor etwa zwei Jahren erzählte der Laborant des Institutes, er habe bei einem Escamoteur Betäubung von Fischen durch den electrischen Strom gesehn. Ich wiederholte das Experiment sofort mit Herrn Dr. Kessel an mehreren Fischen, indem ich den ganzen Wasserbehälter in den Ruhmkorff'schen Apparat einschaltete. Wirklich legten sich die Fische nach wenigen Schlägen auf den Rücken, bekamen meist Tetanus und erholten sich nach einiger Zeit wieder. Anfangs schien es, als ob die Fische in einem durch die Ruhmkorff-Pole bestimmten Sinne sich umlegen würden. Da sich aber dies nicht constant zeigte und die Sache zudem in viele Fragen der Nervenphysiologie einzugreifen schien, wurden die Experimente wieder aufgegeben.

Vor einiger Zeit erhielt ich nun an kleinen Exemplaren von Cobitis barbatula L. bei Anwendung des constanten Stromes sehr gleichförmige Resultate. Die etwa 7^{cm} langen Fische befinden sich in einem kleinen Glasgefäss, dessen Wasser eine Spur Kochsalz enthält. Sofort beim Durchleiten des Stromes durch den Kopf mit Hilfe zweier Platinplatten werden die Fische sehr ruhig und

legen sich auf den Rücken, indem der Rücken constant gegen den Zinkpol der angewandten aus sechs Elementen hintereinander bestehenden Smee'schen Batterie umsinkt. Gleich nach der Unterbrechung des Stromes befinden sich die Fische wieder wohl und munter. Nach mehrmaliger Wiederholung des Experimentes zeigen sie jedoch später spontan Schwindelerscheinungen und gehen zu Grunde. Folgerungen kann ich, wie gesagt, aus diesem complicirten Experiment nicht ziehen, glaube aber, dass die Erwähnung desselben nicht ganz unnütz sein wird.

Vergleichung der Bewegungsempfindungen mit andern Sinnesempfindungen.

1.

Unter den Naturerscheinungen hat eine gewisse Gruppe, die wir als unsern Körper bezeichnen, für uns eine besondere subjective Wichtigkeit. Die Erscheinungen lassen sich in Elemente zerlegen, die wir, insofern sie als mit bestimmten Vorgängen des Körpers verbunden und durch dieselben bedingt angesehn werden können, Empfindungen nennen. Vermöge des allgemeinen Naturzusammenhanges greifen die Vorgänge oft in jenes subjective Gebiet über. Der Reiz erregt Empfindung, wie man zu sagen pflegt.

Die Kenntniss des Zusammenhanges der Naturerscheinungen, oder der Regeln, nach welchen sich wiederholende Erscheinungen erfolgen, setzt uns in den Stand, die jedesmalige vollständige Beobachtung der Erscheinungen zu ersparen. Es handelt sich also darum, zu einem gegebenen Erscheinungstheil den Rest abzuleiten. Bei der Beschreibung des Zusammenhanges der Erscheinungen suchen wir so viel wie möglich auf einmal und ein für allemal anzugeben. Darin besteht eben die Naturwissenschaft. Zu diesem Zwecke hat man die Erscheinungen in möglichst leicht vorstellbare und herstellbare Elemente zu zerlegen, aus deren Addition dann die Erscheinung besteht. Ein Phänomen lässt sich dann durch die blosse Abzählung dieser Elemente beschreiben, denn das Zählen ist eben das einfachste Beschreiben. Die Regel besteht dann in der Angabe des Zahlenzusammenhanges der Erscheinungselemente der einen Art

mit jenen der andern Art. Wenn wir z. B. die Arbeit angeben, welche zur Wasserzersetzung nothwendig ist, so sagen wir, für p Kilogramme, welche ein Meter tief durch die Wirkung der Schwere sinken, erscheinen q Cubikcentimeter Knallgas. Der mechanische und der chemische Theil der Erscheinung ist in gleiche abzählbare Elemente zerlegt und der Zahlenzusammenhang zwischen beiden ist angegeben.

Die neuere Physik hat die Einsicht gewonnen, dass alle Erscheinungsarten mit einander und demnach auch mit mechanischen zusammenhängen. Die mechanische Arbeit, welche einer Erscheinung entspricht, gibt also ein in allen Gebieten verwendbares Erscheinungsmerkmal ab.

2.

Könnte man ein Sinnesorgan in unveränderlichem Zustande erhalten, so würde einem constanten Reize eine constante Empfindung entsprechen. Liefert der Reiz in der Zeiteinheit die Arbeit A, so entspricht für den Empfindungsvorgang der Zeiteinheit die Arbeit a. Ein auf die Pupille fallendes Lichtbündel würde z. B. in der Zeiteinheit die mechanische Arbeit A liefern, davon würde nach allen Brechungen und Reflexionen in der Netzhaut der Bruchtheil α verbleiben und daselbst eine Empfindungsarbeit a auslösen, welche auch vielmal grösser sein kann als α. Die Empfindungsarbeit wird nämlich nicht vom Reize geleistet, sondern der Reiz ist bloss der Anlass zur Auslösung der Arbeit anderer Kräfte, welche in den Sinnesorganen vorhanden sind. Die Sinnesorgane wirken also nach einem Princip, welches von jenem der meisten physikalischen Apparate sehr verschieden ist, sie wirken nach Art eines R e l a i s. Hierauf beruht eben die hohe Empfindlichkeit der Sinnesorgane.

Einem constanten Reizstrom würde also bei unverändert erhaltenem Organ ein constanter Empfindungsstrom entsprechen. So einfache Verhältnisse finden wir jedoch nicht vor. Einmal sehen wir in der Regel den ausgelösten Empfindungsvorgang fortdauern, wenn der Reiz erlischt, eben weil der Reiz nicht die Empfindungsarbeit, sondern bloss die Auslösungsarbeit verrichtet. Diese Fortdauer gibt das sogenannte p o s i t i v e N a c h b i l d. Ferner wird durch den Reiz der Arbeitsvorrath des Organs erschöpft und das

Organ dadurch in einen Zustand geringerer Empfindlichkeit versetzt. Desshalb entspricht einem constanten Reize in der Regel eine an Stärke abnehmende Empfindung. Mit der Erschöpfung des Organs treten aber Folgezustände ein, durch welche das Organ seinen ursprünglichen Zustand wieder zu gewinnen sucht. Diese Folgezustände sind die Ursachen anderer Arten von Nachbildern.

Plateau*, der sich um dieses Capitel besonders verdient gemacht hat, war der Meinung, dass für alle diese Vorgänge ein allgemeines Gesetz aufgestellt werden könne, welches er folgendermaassen formulirt hat:

»Lorsque un organe est soumis à une excitation prolongée, il oppose une résistance qui croît avec la durée de cette excitation. Alors s'il vient à être subitement soustrait à la cause excitante, il tend à regagner son état normal par une marche analogue à celle d'un ressort qui, écarté de sa forme d'équilibre et abandonné ensuite à lui même, revient à cette forme par des oscillations decroissantes en vertu desquelles il la dépasse alternativement en deux sens opposés. C'est-à-dire que l'organe, au moment où il cesse d'être sous l'influence de la cause excitante, marche d'abord rapidement vers son état normal; mais qu'emporté par une sorte de vitesse acquise, il dépasse cet état normale pour se constituer momentanément dans un état opposé; puisqu'il revient de nouveau vers l'état normal, et tend encore à dépasser celui-ci en reprenant, mais avec moins d'intensité, l'état corréspondant à l'excitation, pour repasser une seconde fois, mais plus faiblement aussi, à l'état contraire, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'état normal soit définitivement atteint.

De ces états successifs de l'organe résulte une suite de phases de la sensation alternativement opposées, et décroissantes en intensité, phases dont les unes sont de la même nature que la sensation primitive et peuvent être appelées les phases positives, tandis que les autres sont d'une nature contraire et peuvent être appelées les phases négatives.«

---

* Essai d'une théorie générale comprenant l'ensemble des apparences visuelles qui succèdent à la contemplation des objects colorés ect. Mém. de l'Acad. de Bruxelles. T. 8.

3.

Plateau hat sein Princip durch viele zum Theil sehr schlagende Beispiele belegt. Doch scheint mir dasselbe in dieser Form ausgesprochen ohne Modification nicht allgemein gültig zu sein. Es ist nicht zu bezweifeln, dass die Folgezustände des erregten Organs in vielen Fällen oscillatorisch verlaufen. Dagegen geht die Annahme, dass der Hergang immer oscillatorisch ist, zu weit und wird durch die Thatsachen nicht bestätigt. Auch scheint mir die Benennung positive und negative Phasen nicht durchaus bezeichnend.

Wenn zwei Dinge A und B als positiv und negativ im Verhältniss zu einander bezeichnet werden, so versteht man darunter, dass A durch die Hinzufügung von B ganz oder theilweise vernichtet werden kann. Dieses Verhältniss besteht nun zwischen manchen Empfindungen und ihren Nachbildern, aber nicht zwischen allen. Dieses Verhältniss besteht z. B. zwischen der Empfindung einer Bewegung und dem Nachbilde derselben, welches eine vollständig ähnliche nur dem Sinne nach entgegengesetzte Bewegung ist. Es besteht aber z. B. nicht zwischen den Empfindungen Schwarz und Weiss, von welchen ebenfalls die eine das Nachbild der andern sein kann*). Beide Empfindungen sind einander durchaus unähnlich und beide zusammen heben sich nicht auf, sondern geben wie zwei verschiedene Farben eine Mischfarbe, sie geben Grau. Gerade in diesem Falle ist also die Bezeichnung positiv und negativ nicht passend. Wir wollen uns daher damit begnügen, zu sagen, dass die Folgezustände einer Erregung sehr mannigfaltig sein und sehr verschiedene Empfindungen auslösen können, welche zuweilen auch oscillatorisch wechseln und in dem Gegensatze von + und — zu einander stehn können.

Die allgemeinste Erscheinung im Gebiete der Empfindungsvorgänge scheint die Nachdauer der Empfindung zu sein. Das zeitweilige Fortbestehn der Empfindung nach dem Erlöschen des Reizes ist begreiflich, wenn man bedenkt, dass der Empfindungsvorgang nur eine mittelbare Folge des Reizvorganges ist und dass er für sich abläuft. Hierauf beruht es, dass intermittirende Licht-, Schall-

*) Mach, über intermittirende Lichtreize, Archiv von Reichert u. Dubois 1865.

und Tastreize sich zu einem continuirlichen Empfindungsstrom zusammensetzen.

Die Erschöpfung des Organs durch einen länger anhaltenden Reiz ist auch eine sehr allgemeine Erscheinung, wenngleich die Erklärungen, die man auf diese Erschöpfung gegründet hat, nicht immer ausreichend sein mögen. Wir sehn die Erscheinung deutlich am Tast- und Gesichtssinn. Am Gehörsinn ist sie schwer nachweisbar. Man meint einen constanten Ton stundenlang in constanter Intensität zu hören. Doch gibt es Beobachtungen, welche auf eine solche Erschöpfung auch beim Gehörorgan deuten.

Klemmt man eine Taste des Harmoniums fest und beobachtet den constanten Ton durch etwa eine halbe Stunde, so kann man zwar keine allmälige Abschwächung des Klanges wahrnehmen, aber ein Oberton nach dem andern tritt jetzt in voller Deutlichkeit hervor, was sich doch nur aus einer Erschöpfung für jene Partialtöne gut erklären lässt, welchen die Aufmerksamkeit früher zugewendet war*).

Führt man im Zimmer mit dem Hammer einen Schlag auf den Tisch, so ist der Schall sehr kurz und man meint, bald nach dem Aufschlagen absolute Stille zu vernehmen. Wir können aber das Experiment modificiren. Ein Gehülfe schlägt mit dem Hammer auf den Tisch, während wir mit den Fingern beide Gehörgänge zudrücken. Oeffnen wir die Gehörgänge 0.5—1.0 Secunden nach dem Aufschlagen, so hören wir den Schlag neu entstehn. Wir können nach dem Aufschlagen einigemale die Gehörgänge rasch öffnen und schliessen und hören bei jedem Oeffnen einen neuen Schlag, der natürlich desto schwächer ausfällt, je später das Oeffnen nach dem Aufschlagen erfolgt. Dies erklärt sich aus dem im Zimmer fortbestehenden allmälig abnehmenden Schallvorgang, der nur von dem nicht ermüdeten Organe bemerkt wird oder wenn das Organ kurze Zeit Gelegenheit hatte, sich zu erholen.

Teleologisch ist es ganz begreiflich, warum alle Vorgänge des Gehörsinns als eines Zeitsinnes sehr rasch ablaufen müssen, wenngleich die physiologische Erklärung schwierig genug sein mag. Eigentliche Nachbilder des Schalles kann man daher direct gar nicht

*) Mach, Einleitung in die Helmholtz'sche Musiktheorie. Graz 1866. S. 29.

beobachten. Die Existenz derselben wird nur wahrscheinlich durch das Verschmelzen intermittirender Schallreize. Die Erholung des erregten Organs findet muthmasslich sehr rasch statt. Selbstverständlich kann von einem negativen Schallnachbilde nicht die Rede sein. Es gibt nicht zwei Schallempfindungen, von denen die eine die andere aufheben könnte.

Die mannigfaltigsten Folgezustände einer Erregung lassen sich im Gebiete des Gesichtssinnes beobachten. Der Gesichtssinn ist ein Raumsinn und alle Vorgänge laufen hier sehr langsam ab. Eine solche Nachbilderscheinung, welche zu unserm Hauptgegenstande bei oberflächlicher Betrachtung in naher Beziehung zu stehn scheint, wollen wir hier eingehender besprechen.

4.

Malt man auf eine Scheibe eine Archimedes'sche Spirale und dreht dieselbe um eine durch den Ausgangspunkt der Spirale senkrecht gegen die Scheibe gehende Axe langsam dem Sinne des Uhrzeigers entgegen, so scheinen sich die Windungen der Spirale zu erweitern. Hält man nun nach einiger Zeit die Scheibe plötzlich an, so scheint die Scheibe oder irgend ein Gegenstand, den man anblickt, fort und fort zu schrumpfen. Das Gegentheil tritt ein, wenn man die Scheibe so dreht, dass die Spirale schrumpft und dann anhält. Das beschriebene Experiment rührt von Plateau her. Aehnliche Beobachtungen sind ohne Apparat schon früher von Purkyně und später von Oppel gemacht worden. Oppel hat die Versuche mit einem besondern Apparat fortgesetzt.



Fig. 9.

Plateau und Oppel haben schon angenommen, dass die Be-

wegungsnachbilder durch Vorgänge in der Retina bedingt sind. Die Erklärung derselben durch Augenbewegungen, welche Helmholtz später versucht hat, lässt sich schon durch die Details der älteren Versuche ad absurdum führen. Denn wenn eine scheinbar sich erweiternde gedrehte Spirale ein scheinbares Schrumpfen der nachher betrachteten Gegenstände gegen ein bestimmtes Centrum hin bewirkt, wenn das Oppel'sche Bewegungsnachbild in der Mitte rascher strömt als am Rande, so sind dies Beweise genug gegen die Augenbewegung; denn Augenbewegungen können nur eine gleichmässige Verschiebung des ganzen Gesichtsfeldes bewirken. Auch die Behauptung von Helmholtz, dass die Erscheinungen bei strenger Fixation eines Punktes nicht eintreten, erweist sich bei näherer Prüfung als unhaltbar. Herr Dr. Dvořak*), der in meinem Laboratorium diese Experimente wiederholte, hat den Plateau'schen Versuch in eine sehr eclatante Form gebracht. Man lege auf eine grosse weisse Scheibe mit einer Spirale eine kleinere concentrische mit einer entgegengesetzt laufenden Spirale, auf diese etwa noch eine dritte, noch kleinere, mit einer der ersten gleichlaufenden Spirale, und auf das gemeinschaftliche Centrum aller Spiralen einen kleinen schwarzen Kreis. Vor der so zusammengesetzten Scheibe mögen noch einige schwarze Fäden gespannt sein. Während nun die Scheibe gedreht wird, kann man das Centrum ganz scharf fixiren, indem sich jede Blickschwankung sofort durch die hellen Nachbildränder des Centrums und der schwarzen Fäden verräth. Sieht man dann nach einem weissen linirten Schirme, so erscheint auf demselben das dunkle Nachbild der Scheibe in drei theils schrumpfende, theils schwellende Ringe getheilt, und in diesem Nachbilde ganz fest und ruhig die hellen Nachbilder des Centrums und der Fäden. Hiebei ist zu bemerken, dass die scheinbare Bewegung im Nachbilde immer nur schwächere Pünktchen und Fleckchen ergreift, nie aber deutlich gesehene Punkte und Linien. Diese optischen Bewegungsnachbilder sind also eben so locale Erscheinungen der Netzhaut als die Licht- und Farbennachbilder und treten wie diese bei ruhiger Fixation auf.

---

*) Ueber die Nachbilder von Reizveränderungen. Sitzgsber. d. Wiener Akad. Bd. 61.

Ich bin auf dieses Phänomen, welches sich als das Nachbild einer Reizveränderung auffassen lässt, hier eingegangen, weil Plateau dasselbe als einen Fall seines allgemeinen Gesetzes ansieht und in einem Schreiben an mich auch die Ansicht ausgesprochen hat, dass die von mir bei passiven Bewegungen beobachteten Empfindungen ebenfalls unter sein Gesetz fallen. Wir werden sehn, dass Letzteres nicht zutrifft.

5.

Es ist nicht uninteressant zu bemerken, dass noch eine andere Reizveränderung ebenfalls ein Nachbild gibt. Bei seinen zahlreichen Versuchen fand nämlich Dr. Dvořak* noch ein Nachbild der Lichtintensitätsänderung. Für alle übrigen Veränderungen, bei welchen Nachbilder vermuthet wurden, war das Versuchsresultat negativ. Lässt man die Lichtintensität in einem Zimmer von einem gewissen Werth i ziemlich schnell auf einen andern $i + \triangle i$ wachsen, dann plötzlich auf i fallen und wieder auf $i + \triangle i$ steigen, und lässt dann nach oftmaliger Wiederholung des Processes die Lichtintensität plötzlich constant, so scheint dieselbe deutlich fort und fort kleiner zu werden, Die Umkehrung des Versuches ist selbstverständlich.

Das Experiment lässt sich einfach so ausführen: Das Fensterladenloch eines verdunkelten Zimmers wird mit einem hutförmigen, in das Zimmer ragenden Aufsatz verschlossen, welcher am Deckel eine mit mattem Glas bedeckte Spalte trägt. Die Spalte steht radial zu einer vor derselben drehbaren undurchsichtigen Scheibe, deren Umfang durch einen Spiralgang gebildet wird. Nun setzt man noch eine matte Glastafel vor, die je nach der Stelle der Spirale stärker oder schwächer diffus beleuchtet wird und die man beobachtet. Es ist klar, dass je nach dem Drehungssinn der Scheibe die Spalte immer allmälig geöffnet und plötzlich geschlossen oder allmälig geschlossen und plötzlich geöffnet wird. Im ersten Falle scheint sich die Glastafel, wenn man mit der Drehung aufhört, fort und fort zu verdunkeln, im zweiten fort und fort zu erhellen.

Die Zahl der Umdrehungen war 2 bis 3 in der Secunde, die Versuchszeit im Durchschnitt 1 Minute; die Spalte war 1.5 Zoll lang,

---

*) a. a. O.

2 Linien breit; der Durchmesser der Scheibe war 2 Fuss, die Ganghöhe der Spirale 1.5 Zoll.

Beobachtet man während des Versuches das Zerstreuungsbild eines nahe an das Auge gebrachten glänzenden Stecknadelknopfes, so sieht man dasselbe entsprechend den Veränderungen der Pupillenweite bei jeder plötzlichen Erhellung schwach zusammenzucken, bei jeder plötzlichen Verdunklung sich schwach vergrössern. Nach Beendigung der Drehung kann man nichts mehr am Zerstreuungsbilde bemerken.

Um den Einfluss der Pupillenweite bei der Erscheinung möglichst zu eliminiren und zu untersuchen, ob gleichzeitige Erhellung und Verdunklung in verschiedenen Theilen des Gesichtsfeldes als Nacherscheinung eintreten könne, wurde der Versuch folgendermaassen angestellt:



Fig. 10.

Der Hutdeckel erhält zwei Spalten, welche in demselben Radius einer grossen vor denselben drehbaren Glasscheibe (Fig. 10) liegen. Die Scheibe ist schwarz bemalt und nur zwei ringförmige Räume an derselben sind durchsichtig gelassen. Diese sind nach aussen durch einen Kreis, nach innen durch einen Spiralgang begrenzt. Die Spiralen laufen bei beiden Ringen entgegengesetzt. Wird nun bei der Drehung die eine Spalte allmälig geschlossen, so wird die andere ebenso allmälig geöffnet.

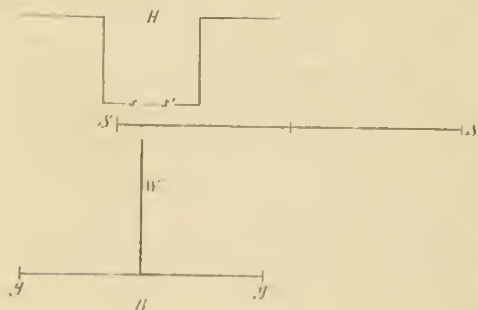


Fig. 11

Die Fig. 11 gibt die Anordnung des Versuches. Der Hut ist durch *H*, die Spalten mit matten Gläsern durch *ss'*, die Scheibe durch *SS* angedeutet. Das Licht der beiden Spalten wird durch die undurchsichtige Zwischenwand *W* gesondert und auf die beiden Hälften einer matten Tafel *gg* vertheilt.

welche vom Beobachter *B* betrachtet wird. Hier sieht man während der Drehung immer die eine Hälfte sich erhellen, die andere sich verdunkeln. Hält man die Scheibe plötzlich an, so tritt sofort augenfällig das Umgekehrte ein; die Hälfte, welche sich zuvor erhellte, verdunkelt sich, die andere erhellt sich zusehends. Also auch diese Erhellungs- und Verdunkelungsnachbilder, wie man sie passend nennen könnte, sind locale Netzhauterscheinungen und können nicht von Pupillenänderungen allein herrühren.

Wenn man bei diesem Versuch wieder das Zerstreuungsbild zu Rathe zieht, so findet man, dass bei jedesmaliger Oeffnung der Spalte die Pupille etwas zusammenzuckt. Obgleich nun die Spiralen so gewählt sind, dass die Intensität des Gesammtlichtes, welches durch beide Spalten eindringt, constant bleibt, so scheint doch jede neue Lichtvertheilung als Reiz auf die Iris zu wirken. Das Erhellungs- und Verdunklungsnachbild schien bei Versuchen mit einer Spalte etwas stärker aufzutreten, als bei zwei Spalten. Es muss demnach dahin gestellt bleiben, ob und welchen Antheil Aenderungen der Pupillenweite bei der Erscheinung haben.

6.

In den beiden letzten von Plateau und Dvořak untersuchten Fällen lässt sich nun das Nachbild in der That als negativer Gegensatz der anfänglichen Erregung bezeichnen. Aber oscillatorisch ist der Verlauf der Folgezustände nicht. Schon früher habe ich eine Hypothese ausgesprochen, welche zu verlassen mir bisher unnöthig erschienen ist. Nach dieser Hypothese hat man bei einem Empfindungsvorgang so viele verschiedene physikalische Processe anzunehmen, als man Empfindungsqualitäten psychologisch in demselben zu unterscheiden vermag*). Für ähnliche Empfindungen wird man ähnliche Processe, für unähnliche Empfindungen unähnliche Processe annehmen müssen.

Dem entsprechend werden wir daran denken müssen, dass mit der Bewegung eines Netzhautbildes ein besonderer Process erregt

*) Mach, über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut. Sitzgsber. d. Wiener Akademie. Bd. 52.

wird, der bei der Ruhe nicht vorhanden ist, und dass bei entgegengesetzten Bewegungen ganz ähnliche Processe in ähnlichen Organen erregt werden, welche sich aber gegenseitig in der Art ausschliessen, dass mit dem Eintreten des einen der andere erlöschen muss, und mit der Erschöpfung des einen der andere eintritt. Es ist dies keine Theorie, sondern ein physikalischer Ausdruck des psychologisch Beobachteten. Ganz Analoges lässt sich über das Nachbild der Lichtintensitätsänderung sagen.

7.

Indem wir es zunächst ganz in Frage lassen, ob es besondere Organe der Bewegungsempfindung gibt und wo dieselben zu suchen seien, können wir, die Bewegungsempfindungen selbst mit andern Empfindungsgebieten vergleichend, leicht folgende Punkte hervorheben. Bewegungsempfindungen werden durch Beschleunigungsdifferenzen gewisser Körpertheile erregt. Die Beschleunigung wirkt also, sofern sie Nervenarbeit auslösen kann, als Reiz für die Bewegungsempfindungen. Wie aus mehreren vorher angeführten Versuchen hervorgeht, dauert die Bewegungsempfindung noch fort, wenn die Beschleunigung schon verschwunden ist. Ferner lehren die Versuche, dass bei fortdauernder Beschleunigung (also fortdauerndem Reize) Erschöpfung der Bewegungsempfindung eintritt. Das Plateau'sche Gesetz gilt also hier nicht. Beim Erlöschen des Reizes zeigt sich keine negative Phase der Bewegungsempfindung. Mit dem Aufhören der Beschleunigung verschwindet allmälig die Bewegungsempfindung, ohne in das Gegentheil umzuschlagen. Vielmehr ist zur Erzeugung der entgegengesetzten Bewegungsempfindung auch die entgegengesetzte Beschleunigung nöthig. Entgegengesetzte Beschleunigungen erregen demnach einander ganz ähnliche Empfindungsprocesse, die also auch durch ähnliche Organe vermittelt sind. Diese Processe stehn aber in einem derartigen Gegensatz, dass beide gleichzeitig eintretend einander aufheben können, wie der Versuch 3. S. 26 lehrt. Es ist dies kaum anders denkbar als dadurch, dass es verschiedene ein-

ander sehr ähnliche aber entgegenwirkende Organe sind, welche durch entgegengesetzte Beschleunigungen gereizt werden.

Weitere Untersuchung der Erscheinungen.

1.

In dem Vorhergehenden wurde ganz vorläufig das Ohrlabyrinth als wahrscheinliches Haupt-Organ der Bewegungsempfindungen bezeichnet. Hier sollen nun die verschiedenen möglichen Quellen der Bewegungsempfindungen noch einmal untersucht und kritisch durchgemustert werden. Wie wir schon bemerkt haben, kann die Relativbeschleunigung je zweier Körpertheile gegeneinander Anlass zu Empfindungen geben, welche als Merkmale der Bewegung benutzt werden könnten. Wir wollen also untersuchen, ob die Empfindungen, durch welche wir über die Bewegungen unseres Körpers Aufschluss erhalten, herrühren

a) von dem Bindegewebe und den Knochen,
b) von der Haut,
c) von den Muskeln,
d) vom Blute,
e) von den Augen,
f) vom Hirn oder endlich
g) von einem eigenen Organe im Kopfe.

2.

Betrachten wir zunächst die erste Möglichkeit. Wenn das Bindegewebe und die Knochen sensible Nervenfasern enthalten, so können Relativbeschleunigungen der Theile dieser Gewebe gegeneinander immer Anlass zu localen Druckempfindungen geben. Man sieht aber leicht, dass diese Empfindungen in Bezug auf ihre Verwerthbarkeit als Merkmale der Locomotion sehr zweifelhafter Natur sein müssen. Betrachten wir zwei solche Körpertheile A und B. Erhält A durch eine äussere Kraft eine Beschleunigung gegen B hin, so entsteht durch den Druck und Gegendruck von A und B eine Empfindung E. Dieselbe Empfindung tritt aber auch auf, wenn B

gegen A beschleunigt ist, wobei also der Sinn der Locomotion gerade entgegengesetzt sein wird. Eine andere Empfindung F' kann auftreten, wenn A von B weg beschleunigt wird, also Zug und Gegenzug zwischen A und B entsteht, der aber wieder derselbe ist bei der Beschleunigung des B von A weg, also wieder beim entgegengesetzten Sinn der Locomotion. Mit einem Wort, Bindegewebe und Knochen können möglicher Weise die bei Locomotionen auftretenden Zerrungen und Pressungen empfinden, welche Zerrungen und Pressungen aber keinen Aufschluss über den Sinn der Beschleunigung und der Locomotion geben. Da wir nun, wie der Versuch lehrt, den Sinn der Beschleunigung unzweifelhaft empfinden, so ist die Hypothese unhaltbar, dass die betreffenden Bewegungsempfindungen durch die sensiblen Nerven des Bindegewebes und der Knochen geliefert werden.

3.

Alle passiven Bewegungen, die unser Körper erhält, rühren von Beschleunigungen her, welche zunächst die Haut ergreifen, und auch bei den activen Bewegungen ist ein Stützen und Stemmen des Körpers auf mit empfindlicher Haut versehene Oberflächentheile unvermeidlich. Der Gedanke liegt also nahe, dass die Bewegungsempfindungen Hautempfindungen seien. Wenn auch wohl niemand, welcher die hier beschriebenen Versuche ausführt, unter dem Eindruck derselben den Hautempfindungen die grösste Wichtigkeit zuschreiben wird, so muss man doch zugeben, dass sie bei den Experimenten nicht vollständig eliminirt werden können. Wir können aber die Hautempfindungen sehr gewaltig modificiren, ohne eine Täuschung über die Art der passiven Körperbewegung herbeizuführen, und es wird hiedurch sehr unwahrscheinlich, dass sie als Bewegungsempfindungen eine wichtige Rolle spielen.

Versuch 1. Wir nehmen eine winkelig geknickte Kiste (Fig. 12), an welcher der Theil *fg hi* sehr flach ist und die nur bei *ab cd* offen ist. In diese Oeffnung setzen wir einen gutpassenden kistenförmigen Stempel S. Beim raschen Herausziehn dieses Stempels tritt in der Kiste eine bedeutende Luftverdünnung und eine bedeutende Verminderung des Luftdruckes ein. Wir begiessen nun

die Fläche *fg hi* mit Gyps und treten mit den blossen Fusssohlen darauf. Ist der Abdruck erhärtet, so wird die von den Fusssohlen berührte Fläche durchbrochen, so zwar, dass wenn man sich wieder auf die Kiste stellt, die Fusssohlen selbst einen Theil der Kistenwand bilden und den Innenraum der Kiste luftdicht abschliessen helfen. Alsdann wird der ganze Apparat am Boden festgeschraubt und der Stempel kräftig aufgezogen. Die Fusssohlen haben für gewöhnlich bloss die ganze Last des Körpers zu tragen, beim Aufziehen des Stempels aber noch das Uebergewicht des äussern Luftdrucks gegen den auf die Sohlenfläche entfallenden Luftdruck im Innern der Kiste. Man fühlt auch sofort ein mächtiges Andrücken der Fusssohlen und es hat den Anschein, als ob der Boden sich unter den Füssen etwas heben würde. Die Empfindung, dass der ganze Körper steigt, auf die es eben ankäme, hat man aber nicht. Macht man bloss unter der einen Sohle eine Oeffnung, so scheint sich der Boden mehr unter dieser zu heben.

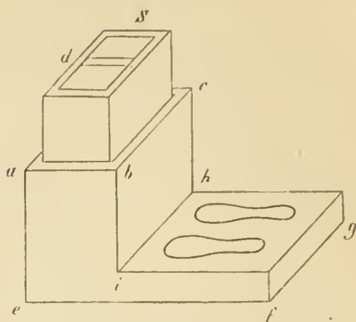


Fig. 12.

Der Luftdruck an der ganzen Oberfläche des Körpers ändert sich nicht, wird auch nicht empfunden. Was man bei dem Versuch empfindet, ist bloss ein Ueberdruck auf die Fusssohlen. Dieser müsste uns ein Steigen unseres Körpers vorspiegeln, wenn die Hautempfindungen identisch mit den Bewegungsempfindungen wären.

Versuch 2. Wenn wir horizontal in einer Kiste auf dem Rücken liegen, welche von oben gesehn sich im Sinne des Uhrzeigers zu drehen beginnt, so fühlen wir den beschleunigenden Druck der Kistenwände an dem rechten Arm und der rechten Schulter und an der linken Wade. Dieser Druck wird viel stärker, wenn der Boden der Kiste, auf welchem wir liegen, für sich beweglich ist. Der Druck kehrt sich um, wenn wir im Gegentheil die Seitenwände der Kiste für sich beweglich machen und mit Steinen beschweren. Wir empfinden dann den Druck bei der beginnenden Uhrzeigerbewegung an der linken Schulter und am rechten Bein. Trotz dieser gewaltigen

Modificationen der Hautempfindung sind wir, in der Kiste eingeschlossen, doch nie im Zweifel über den Drehungssinn und sondern die Haut- und Bewegungsempfindungen sehr wohl von einander, wenn sie in Widerspruch gerathen. Wir kommen auf dieses und ähnliche Experimente noch bei Untersuchung der Muskelempfindungen zurück.

Nennen wir ein Element der Hautoberfläche df, die auf die Flächeneinheit nach der Richtung x wirkende Kraft X und dt das Zeitelement, so muss, damit unserem Körper in verschiedenen Fällen nach der Richtung x dieselbe Bewegungsgrösse ertheilt werde, das Integral $\int\int X df.dt$ in allen diesen Fällen denselben Werth haben. Nun ist es allerdings richtig, dass wir die Vertheilung der Druckkräfte auf die Haut beliebig abzuändern und zu modificiren, dass wir aber den Werth dieses Integrales nicht zu ändern vermögen, ohne auch wirklich die Bewegungsgrösse unseres Körpers abzuändern. Man könnte also auf den Einfall kommen, dass wir durch irgend einen unbewussten Schluss den Werth dieses Integrals erfahren und als Kennzeichen der Bewegung benützen. Aber auch die Liebhaber der unbewussten Schlüsse werden in dieser Auffassung Schwierigkeiten finden.

Es werden beträchtliche Veränderungen in der Hautempfindung eintreten können, ohne dass sich der Werth des Integrals ändert. Ferner bringt nicht jede Veränderung der Kräfte eine entsprechende zu ihr in einfacher Beziehung stehende Aenderung der Empfindungen hervor. Man müsste, damit der Werth des obigen Integrals auch empfunden werde, annehmen, dass die Druckkräfte X dieselbe Empfindung auslösen, ob sie normal oder tangential auf die Hautelemente wirken. Die Elemente des Integrals und die entsprechenden Elemente der Empfindung gehen durchaus nicht parallel.

Bei dem obigen Luftdruckversuch ändert sich der Werth des Integrals nicht. Der Körper bleibt ja nach wie vor in Ruhe. Die Hautempfindung hat aber eine wesentliche Aenderung erfahren, welche zu der erwähnten Täuschung Anlass gibt, ohne jedoch eine Bewegung des Körpers vorzuspiegeln.

Dasselbe, was hier für die Fortschrittskräfte gilt, kann man bei dem Drehversuch in der Kiste von den Drehungsmomenten sagen. Die Summe der auf die Haut applicirten Drehungsmomente muss

natürlich bei gleicher Winkelbeschleunigung des Körpers immer dieselbe bleiben. Die Hautempfindungen können dabei sehr mannigfaltig variiren, ohne die Bewegungsvorstellung zu alteriren. Da wir nun von den Druckkräften nur durch die erregten Empfindungen Kenntniss haben, ein einfacher Zusammenhang zwischen den Kräften und Empfindungen aber nicht angegeben werden kann, so wird man die Annahme, dass die Haut die maassgebenden Bewegungsempfindungen liefert, sehr unwahrscheinlich finden.

4.

Dass es ein besonderes Muskelgefühl gibt, ist behauptet und auch bestritten worden. Geläugnet kann nicht werden, dass man Schmerz und Ermüdung der Muskel, so wie den Grad der Anstrengung derselben empfindet, und dass daher sensible Elemente in den Muskeln wahrscheinlich sind. Wir können uns hier mit der Thatsache der Empfindung der Muskelanstrengung begnügen, und es ist uns gleichgültig, ob die Quelle dieser Empfindung in den Muskeln selbst oder in den Centralorganen oder gar in der Haut liegt. Letzteres wird unwahrscheinlich durch den Umstand, dass bei Enthäutung der Extremitäten das Muskelgefühl nicht verloren zu gehen scheint. Wir nehmen also das Muskelgefühl als etwas Gegebenes, Beobachtbares, ohne uns um die Erklärung desselben zu kümmern.

Man kann nun daran denken, dass dieses Muskelgefühl die Kenntniss der activen und passiven Bewegungen vermittelt. Wird der Rumpf in active oder passive Bewegung gesetzt, so kann man sich vorstellen, dass die gegen den Rumpf beweglichen Theile zurückbleiben würden, wenn die relative Lage der Körpertheile nicht durch die Muskeln erhalten würde. Hiezu wird aber die Muskelanstrengung $m(\varphi'-\varphi)$ beziehungsweise $T(\varphi'-\varphi)$ nöthig sein, und diese wird man empfinden. Führt man während der passiven Bewegung noch eine active aus, so gehört hiezu nach den früheren Bemerkungen die Anstrengung $m[\psi+(\varphi'-\varphi)]$ beziehungsweise $T[\psi+(\varphi'-\varphi)]$. Die Empfindung derselben kann nicht nur die passive Bewegung bemerklich machen, sondern auch weil sie eine ungewohnte ist, Ursache werden, dass andere als die beabsichtigten Bewegungen ausgeführt werden. Purkyně führt an, dass die Schrift-

züge beim Schreiben auf der Scheibe des Ringelspiels sich ändern. Ich habe bei so kleinen Bewegungsexcursionen nichts Derartiges wahrnehmen können. Wohl aber ist der Contrast zwischen der beabsichtigten und der ausgeführten Bewegung auffallend bei ausgiebigeren Bewegungen, die man während der passiven Rotation versucht.

Es ist aber kaum anzunehmen, dass die gegen den Rumpf beweglichen Theile durch eine besondere Muskelanstrengung, durch eine besondere Innervation erhalten werden. Bei langsameren Bewegungen genügt die blosse Steifigkeit und Spannung der Muskel mit Hilfe der Reibung, um diese Lage zu erhalten. Bei rascheren Störungen zeigt der Muskelapparat eine Art Elasticität, die man sich durch ein einfaches Experiment zur Anschauung bringen kann. Schlägt man gegen den ausgestreckten Finger einer Hand mit der andern Hand, so weicht der Finger sich biegend dem Schlage und nimmt wie eine Feder seine ursprüngliche gestreckte Lage wieder ein. So dürfte sich überhaupt der Muskelapparat verhalten. Es sind also hier keine besondern Innervationen nöthig, um die Lage zu erhalten oder herzustellen. Demnach werden auch keine besondern Empfindungen auftreten. Liegt man horizontal auf einer Scheibe, welche hinreichend plötzlich in Rotation versetzt wird, so kommen die Körpertheile in der That aus ihrer Lage. Die Muskel haben dieselbe nicht erhalten.

Rühren Bewegungsempfindungen von Muskelanstrengungen her, so müssen diese Bewegungsempfindungen sehr verschieden sein, je nachdem man eine passive Bewegung in mehr oder weniger unterstützter Lage ausführt. Dies kann ich nicht beobachten. Wir wollen nun dennoch mehrere Versuche über die Muskelempfindungen ausführen.

Versuch 1. Beim Ausgiessen von Quecksilber aus einem Gefäss hat man die Empfindung der gewaltsamen Hebung derjenigen Hand, welche das Gefäss hält Man kann auch beim aufmerksamen Zusehen wahrnehmen, dass sich die Hand wirklich etwas hebt. Man empfindet die Verminderung der Muskelanstrengung, welche zur Erhaltung des Gefässes nöthig ist, und indem man dieselbe nicht ebenso rasch zu vermindern vermag, als es eben zur Erhaltung des Gefässes erfordert wird, hebt sich die Hand etwas. Jede solche

Verminderung eines Widerstandes gegen einen Muskel scheint von dem activen Muskel als ein Weichen des Widerstandes und ein Fortbewegen in der dem Widerstande entgegengesetzten Richtung empfunden zu werden.

Versuch 2. Ich habe mir zwei Blechgefässe (Fig. 13), jedes für etwa vier Kilogramm Wasser, mit bequemen Handhaben anfertigen lassen. Dieselben haben am Boden ein Ansatzrohr, über welches ein kurzes Kautschukrohr von 15^{mm} Durchmesser im Lichten gezogen und durch einen Quetschhahn verschlossen wird. Mit diesem einfachen Apparat wurde zunächst folgender Versuch angestellt. Man fasst mit jeder Hand ein Gefäss. Auf Commando werden beide Quetschhähne gleichzeitig geöffnet, und das Wasser fliesst in untergestellte Behälter ab. Man verspürt hiebei namentlich gegen das Ende des Versuches, weil da in der Zeiteinheit der grösste Bruchtheil des noch vorhandenen Gewichtes abfliesst, eine deutliche Erhebung der Arme.

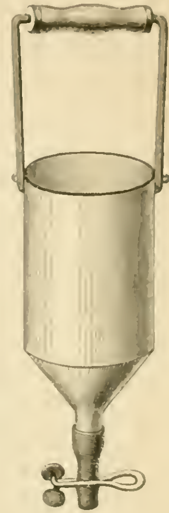


Fig. 13.

Versuch 3. Auf den Kopf wird eine innen gepolsterte Holzkappe gesetzt, jedoch so fest, dass man den Kopf nothwendig mit drehen muss, wenn man die Kappe dreht. In der Nähe des rechten und linken Ohres befindet sich an der Kappe ein Haken. Am rechten Haken greift eine Schnur ein, welche horizontal nach vorne über eine Rolle geht und an der eines der beschriebenen Gefässe hängt. Eine zweite Schnur geht vom linken Haken horizontal nach hinten über eine zweite Rolle und trägt das zweite Gefäss. Beide Gefässe zusammen ertheilen dem Kopfe ein übrigens beliebig variables Drehungsmoment, welches durch die Muskel im Gleichgewicht gehalten wird. Lässt man nun das Wasser aus den Gefässen abfliessen, so fühlt man eine Drehung des Kopfes entgegen demjenigen Sinne, in welchem er durch die Gewichte gedreht würde. Bemerkenswerth ist, dass alle diese Drehungen sehr stark empfunden, aber nur unmerklich ausgeführt werden.

Versuch 4. Man befestigt quer über den Rücken an beiden Schultern eine Holzleiste und lässt in der eben angegebenen Weise

rechts das eine Gefäss nach vorn, links das andere nach hinten ziehn. Auch hier meint man sich beim Abfliessen des Wassers dem Widerstande entgegen zu drehn.

Versuch 5. An dem linken Ende derselben Leiste hängt das eine Gefäss direct und zieht nach unten, das andere befindet sich an einer Schnur, welche von dem rechten Ende der Leiste vertical nach oben über eine Rolle abgeht. Man meint beim Abfliessen des Wassers nach rechts umzusinken.

Versuch 6. An beiden Enden der Leiste rechts und links hängt eines der Gefässe. Beim Abfliessen meint man sich zu strecken und sich aus dem Boden zu erheben.

Bei keinem der sechs Versuche trat eine Erscheinung ein, die sich mit den früher beschriebenen eigenthümlichen Raumvorstellungen und optischen Phänomenen in Vergleich bringen liesse.

In den beschriebenen Versuchen herrscht nun die Eigenthümlichkeit vor, dass man die entstehenden Empfindungen nicht auf eine Bewegung des ganzen Körpers, sondern auf eine Aenderung der relativen Stellung der eben afficirten Theile zu einander bezieht.

Bei den Versuchen 2 und 6 fühlt man Erhebung der Arme, Streckung des Körpers, Emporwachsen aus dem Boden. Hiebei geht nun eigentlich eine Verminderung des Körpergewichtes vor sich. Eine solche Verminderung des Körpergewichtes bedingt aber nach den Beobachtungen an bewegten Menschen die Empfindung des Versinkens des Körpers.

In Versuch 3 greift am Kopf ein Drehungsmoment an, welches denselben von oben gesehn verkehrt wie den Uhrzeiger zu drehen strebt. Diesem Drehungsmoment halten die Muskel das Gleichgewicht. Wird das Drehungsmoment rasch vermindert, so meint man, der Kopf werde wie der Uhrzeiger gedreht; wird es rasch vermehrt, so empfindet man eine Kopfdrehung dem Uhrzeiger entgegen. Gesetzt nun, der Rumpf würde eine Winkelbeschleunigung im Sinne des Uhrzeigers erhalten, so erhielte der Kopf gegen den Rumpf eine umgekehrte relative Winkelbeschleunigung. Die Muskel, welche dieses Streckungsmoment zu vernichten streben, den Kopf in seiner Lage zu halten suchen, aber auf dieses anwachsende Drehungsmoment nicht gefasst sind, würden nach den oben mitgetheilten Versuchen eine Kopfdrehung dem Uhrzeiger ent-

gegen signalisiren. Nach den Beobachtungen an gedrehten Menschen empfindet man aber eine Drehung des ganzen Körpers im Sinne des Uhrzeigers.

Obgleich also die in meiner Arbeit von 1865 benützten Grundsätze gewiss richtig sind, so scheint die Anwendung derselben auf die Muskelgefühle zur Erklärung der Bewegungsempfindungen doch insofern nicht auszureichen, als wir in den Muskelgefühlen theils andere, theils auch den geforderten widersprechende Bewegungsanzeigen zu sehen gewohnt sind. Zur sichern Erkenntniss der Locomotion scheint noch ein anderes Mittel gefordert. Teleologisch ist dies auch begreiflich. Die Muskelempfindungen haben zu berichten über den Erfolg mechanischer Arbeiten, auch solcher, welche mit der Locomotion nichts zu schaffen haben. Dieser Erfolg ist hauptsächlich bestimmt durch die Veränderungen in der Relativstellung der Körpertheile. Er hat mit der Locomotion nichts zu schaffen. Es scheint also ein eigenes Organ zur Perception der Locomotion nöthig.

Noch durch ein Beispiel will ich erläutern, wie verschiedene Ergebnisse man erhält, wenn man dieselben mechanischen Grundsätze auf verschiedene Körpertheile anwendet. Der Beobachter, welcher im Sinne des Uhrzeigers (von oben gesehn) rotirt, ist so zu sagen eine Fessel'sche Schwungmaschine, und alle Erscheinungen derselben müssen an ihm auftreten, wenngleich sie an verschiedenen Theilen in verschiedener Weise empfunden werden. Nickt er bejahend mit dem Kopfe, so wird hiebei dieser ganze Kopf etwas verdreht, und zwar von hinten gesehn verkehrt wie der Uhrzeiger. Gleichzeitig wird der Kopf etwas nach links hinübergeworfen. Beide Bewegungen kann man durch die Muskel merken. Ausserdem meint aber der Beobachter, dass sich der ganze vor ihm befindliche Raum sammt ihm selbst im Sinne des Uhrzeigers dreht, also gerade entgegengesetzt, als er seinen Kopf gedreht fühlt.

5.

Man kann bei einer und derselben passiven Bewegung die Hautempfindung künstlich variiren. Das gleiche Experiment kann man nun mit den Muskelempfindungen anstellen, und da hiedurch Täuschungen über die Art der Bewegung nicht entstehn, so kann man sich durch dieses Mittel von der untergeordneten Rolle über-

zeugen, welche die Muskel bei Erkenntniss der Locomotionen spielen.

Versuch 1. Beginnen wir auf einem Stuhle sitzend eine passive Drehung im Sinne des Uhrzeigers, so erhält der Kopf und der Oberkörper eine entgegengesetzte relative Winkelbeschleunigung. Nehmen wir für einen Augenblick an, dass die Muskel die relative Ruhe der Körpertheile gegeneinander erhalten, und dass die betreffenden Muskelgefühle uns als Bewegungsempfindungen der Uhrzeigerdrehung zum Bewusstsein kommen. Die Empfindung der Bewegung muss sich dann bedeutend ändern lassen, wenn wir jene Muskelgefühle künstlich variiren. Dies kann leicht auf folgende Weise geschehn. In dem Rahmen des beschriebenen Rotationsapparates bringen wir zwei grosse schwere Scheiben auf verticalen Axen leicht drehbar an. Der Beobachter setzt sich in den Papierkasten auf den Stuhl, und zwei Schnüre, welche um jene Scheiben gelegt sind, werden an dessen Kopf und Schultern befestigt, so dass diese Körper bei jeder Beschleunigung des Apparates durch die Scheiben, welche das Flächenprincip zu erfüllen streben, eine Winkelbeschleunigung erhalten. Man kann die Schnur so legen, dass die Winkelbeschleunigung der natürlichen, welche die Körpertheile für sich haben, gleich oder entgegen gerichtet ist. Für den Kopf wollen wir diese beiden Anordnungen A und B schematisch darstellen; sie sind dieselben für die Schultern. Die Scheibe ist durch S, der Kopf, welcher eine fest angezogene Gurte trägt, an der die Schnüre angreifen, ist durch K, und eine Rolle hinter dem Kopf des Beobachters ist durch R angedeutet. Bei der Anordnung A verhält sich der Kopf des Beobachters, wie wenn sein Trägheitsmoment enorm vermehrt wäre. Bei der Anordnung B kann das Trägheitsmoment compensirt oder

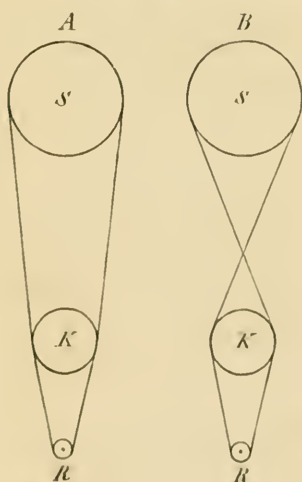


Fig. 14.

sogar negativ sein. Bei *A* müssen also die Muskelempfindungen stärker ausfallen als gewöhnlich, bei *B* müssen sie vermindert oder ganz vernichtet sein oder können sogar den entgegengesetzten Sinn haben.

Das Experiment lehrt nun, dass alles dies den im Papierkasten eingeschlossenen Beobachter über den Bewegungssinn nicht täuschen kann. Er fühlt Kopf und Schultern mächtig im gewohnten oder ungewohnten Sinn gedreht, weiss aber immer, wie sich der ganze Apparat bewegt. Wie man leicht bemerken kann, würde man bei den Anordnungen *A* und *B* immer durch die Hautempfindung der am Kopfe angreifenden Gurte eine Anzeige für die Uhrzeigerdrehung erhalten, wenn die Muskel die entgegengesetzte Drehung signalisiren und umgekehrt, vorausgesetzt, dass Haut und Muskel überhaupt maassgebend wären.

Versuch 2. In den Rahmen unseres Rotationsapparates hängen wir an zwei Seilen ein 2^{m} langes Brett, auf welches sich der Beobachter horizontal ausstreckt. Die Anknüpfungspunkte der Seile am Brette müssen natürlich an fest mit dem Brette verbundenen Haken ziemlich hoch über dem Beobachter sich befinden, damit das Brett nicht umkippt. Ueber den Beobachter wird nun eine ziemlich gut anschliessende Kiste ohne Boden gestülpt und in gleicher Weise frei aufgehängt wie das Brett. Sowohl das Brett als auch die nöthigenfalls mit Steinen beschwerte Kiste können durch besondere Riegel festgestellt und unbeweglich gemacht werden.

Die Disposition, bei welcher das Brett mit dem Beobachter frei beweglich, die Kiste aber festgestellt ist, nennen wir *A*, jene, bei welcher die Kiste frei, das Brett mit dem Beobachter aber fest ist, *B*. Wird nun der ganze Rotationsapparat in Bewegung gesetzt (von oben gesehn) im Sinne des Uhrzeigers, so strebt bei der Disposition *A* der Körper des Beobachters das Flächenprincip zu erfüllen, wird aber durch die fest mit dem Rahmen verbundene Kiste daran verhindert, welche ihm ein Drehungsmoment im Sinne des Uhrzeigers ertheilt. Dieses Drehungsmoment kann er durch die Haut, oder wenn er sich dagegen sträubt, auch durch die Muskel empfinden. Bei der Disposition *B* sucht umgekehrt die Kiste das Flächenprincip erfüllend, dem Uhrzeiger entgegen, zurückzubleiben, wird aber daran durch den Körper des Beobachters verhindert, welcher auf dem im Rahmen festgestellten Brett liegt. Das durch die

Haut oder die Muskel empfundene Drehungsmoment ist nun gerade entgegengesetzt. Der Spielraum der Kiste und des Beobachters muss bei diesem Versuch sehr klein sein, damit die aufgehängten Theile nicht in Schwingungen gerathen können, wobei die Druckkräfte periodisch würden, und der Erfolg des Versuches schwer zu beobachten wäre.

Bei diesem Versuch empfindet nun der Beobachter einen mächtigen Druck in dem einen oder andern Sinne, während er doch nie darüber im Zweifel ist, in welchem Sinne er gedreht wird. Er fühlt sich z. B. nach rechts gedrückt und nach links gedreht. Ohne Zweifel muss, wenn der Körper des Beobachters dieselbe Drehbeschleunigung annimmt, auch die Summe aller auf seine Körperoberfläche wirkenden Drehungsmomente immer dieselbe sein. Allein die Empfindung dieser Drehungsmomente kann sehr variiren und steht überhaupt in keinem einfachen Zusammenhang mit der Summe der Drehungsmomente. Für die Empfindung kann es doch nicht einerlei sein, ob ein Drehungsmoment durch Zerrung der Rückenhaut, auf welcher man liegt, oder durch Druck auf die Seitenflächen des Körpers oder gar durch die Summe oder Differenz beider Affectionen auf den Körper ausgeübt wird. Bringen aber solche Variationen der Druckempfindung keine Täuschungen über den Sinn und das Ausmaass der Bewegung hervor, so ist man wohl zu der Annahme berechtigt, dass sie nicht zu den maassgebenden Bewegungsempfindungen gehören. Also auch diese Versuchsreihe macht die Rolle der Haut- und Muskelgefühle, welche sich nicht immer gut trennen lassen, als Bewegungsempfindungen unwahrscheinlich.

6.

Wie schon bemerkt wurde, scheint für die unzweideutige Erkenntniss der Locomotion ein besonderes Merkmal gefordert, dem nicht schon eine andere wesentlich verschiedene Rolle angewiesen ist. Merkmale, nach welchen wir die Relativstellung der Körpertheile beurtheilen, sind zur Bezeichnung der Locomotion unbrauchbar. Die Blutmasse, überhaupt die im Körper enthaltenen Flüssigkeiten könnten nun ganz geeignet scheinen, Merkmale der Locomotion zu liefern. Der flüssige Körperinhalt drängt rückwärts

bei jeder Beschleunigung, die der Körper vorwärts erhält, aufwärts bei jeder Beschleunigung abwärts. Diese Locomotionsbeschleunigung muss sich mit der Schwerebeschleunigung des Blutes fortwährend zusammensetzen. Im freien Fall des Körpers müsste z. B. das Blutgewicht ganz verschwinden. Die Vertheilung des Blutes im Körper ist aber sehr variabel und wird durch die wechselnde Thätigkeit und das wechselnde Ernährungsbedürfniss der Organe bestimmt. Umgekehrt muss die Abänderung des Blutdruckes bei heftigen Bewegungen auf die Blutvertheilung Einfluss üben. Damit werden die Merkmale der Locomotion schon recht complicirt. Endlich aber, und das scheint die Hauptsache, kann man nicht behaupten, dass man eine unmittelbare Empfindung des Blutdruckes und der Blutvertheilung hat. Zu diesem Zwecke müssten wohl sensible Nerven den vasomotorischen parallel gehn.

Den Einfluss von Beschleunigungen auf die Blutmasse kennt Jedermann. In der erhobenen Hand leeren sich die Venen. Man kann sie aber ziemlich stark füllen, wenn man die ausgestreckte gehobene Hand oder den ganzen Körper bei ausgestrecktem Arm rasch um eine Verticalaxe schwingt. Da nun die Thätigkeit aller Organe wesentlich von der Blutzufuhr abhängt, so muss die Affection der Blutmasse durch Beschleunigungen, die Veränderung ihrer Vertheilung im Körper, mächtige secundäre Folgen haben. Diese Folgen müssen desto auffallender werden, je weniger der die Blutvertheilung regulirende Apparat schnell und kräftig genug wirken kann, um die Massenbeschleunigungen zu compensiren. Schon Purkyně spricht von einer Affection der Blutmasse durch die Centrifugalkraft. Er denkt auch an eine therapeutische Verwerthung dieser Thatsache — vielleicht ein fruchtbarer Gedanke!

Ich muss die endgültige Entscheidung darüber, ob die Blutbeschleunigung als Merkmal der Locomotion verwerthbar ist, ob ein Theil der Bewegungsgefühle direct oder indirect von der Blutbeschleunigung herrührt, den Physiologen überlassen. Hier mögen nur Experimente folgen, welche die directe Erregung von Bewegungsempfindungen durch das Blut unwahrscheinlich machen. Ich wurde zu denselben durch eine Mittheilung meines Freundes J. Popper veranlasst.

Stellen wir uns einen rechteckigen verticalen Rahmen *R* vor,

welcher an zwei verticalen Stäben *ss* ein horizontales Brett *B* trägt. Unter diesem Brett befindet sich ein hölzerner wasserdichter Trog *T*, der mit Hilfe einer Winde, wie sie bei Theaterversenkungen ge-

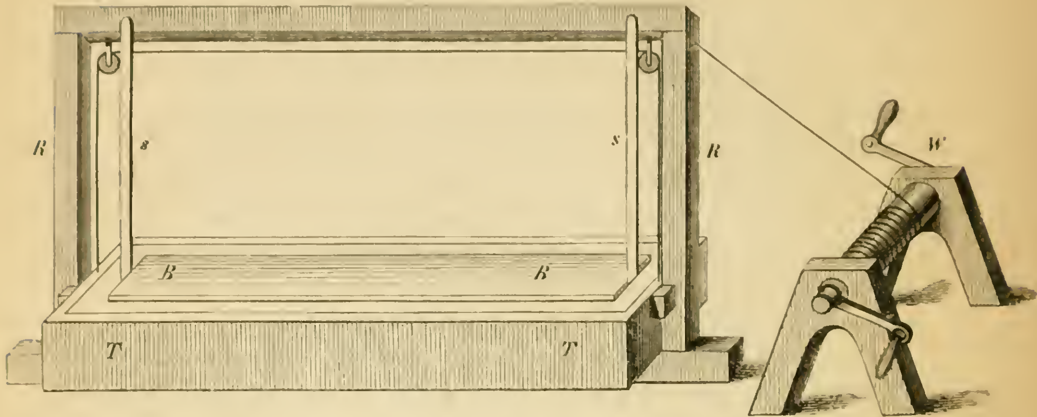


Fig. 15.

braucht wird, in einer Führung auf und ab bewegt werden kann. Der Beobachter legt sich in leichten Kleidern auf das horizontale Brett und der mit lauem Wasser gefüllte Trog wird nun langsam gehoben und gesenkt. Während der Beobachter in absoluter Ruhe ist, wird das Wasserniveau abwechselnd über seinen Körper gehoben und unter denselben gesenkt. Wenn die Temperatur des Wassers gut getroffen ist, fühlt man dasselbe fast gar nicht. Die Hautempfindung wird noch durch das fortwährende Anliegen der mit Wasser angesaugten Kleider vermindert.

Man empfindet nun bei dem Versuche die abwechselnde Verkleinerung und Vergrösserung des Körpergewichtes, welche vermöge des Archimedes'schen Principes beim Heben und Senken des Wasserniveau's eintritt, als veränderten Druck auf die Unterlage. Weder bei offenen noch bei geschlossenen Augen habe ich aber die Empfindung einer Bewegung des Körpers beobachten können. Letztere Empfindung müsste aber eintreten, wenn der Druck auf die untere Hautfläche als Bewegung empfunden werden könnte. Macht man den Versuch so, dass man den Körper durch die eigene Muskelkraft stützt, so spricht der negative Erfolg gegen die Herkunft der Be-

wegungsempfindungen aus Muskelempfindungen. Endlich ist auch die Annahme widerlegt, dass die Blutmasse zur Perception der Locomotion diene. Denn das Blut verliert beim Eintauchen ins Wasser an Gewicht.

Man müsste, wenn nur eines dieser Momente zur Erklärung der Bewegungsempfindungen brauchbar sein sollte, bei Erhebung des Wasserniveau's, also Verminderung des Körpergewichtes, ein Versinken, bei Senkung des Wasserniveaus ein Erheben des Körpers fühlen.

Der Versuch wäre noch schlagender, wenn er, in übrigens gleicher Form, bei verticaler Lage ausgeführt würde. So habe ich ihn noch nicht anstellen können. Doch ist es auch jetzt schon unwahrscheinlich, dass die Beschleunigung der Blutmasse direct eine Bewegungsempfindung liefert.

7.

Unter den Erscheinungen, welche man während und nach der passiven oder activen Drehung des Körpers wahrnimmt, spielen die von den Augen herrührenden eine wichtige Rolle. Purkyně sagt hierüber*):

»Wenn man beim Anfange des Sichherumdrehens genau auf sein Gesichtsfeld achtet, so beharren die Gegenstände erst in relativer Ruhe, indem das Auge durch seine Bewegungen die sich vermöge der Drehung des Körpers immerfort ändernden Raumverhältnisse derselben ausgleicht. Bald aber fangen die Augenmuskeln an zu ermüden und starr zu werden, theils wegen der wiederholten gleichartigen Bewegungen, theils von einem eigenthümlichen krampferregenden Einflusse des Gehirns; sie folgen nicht mehr in gleichem Maasse der Drehung des Körpers, sondern nur absatzweise, indem die Gegenstände jetzt bewegt, jetzt ruhend erscheinen; endlich hört auch dieser Kampf auf, und das unwillkührlich fixirte Auge bewegt sich gleichmässig mit dem übrigen Körper, indess die sichtbaren Gegenstände nach entgegengesetzter Richtung immer schneller und schneller umlaufen, jedoch nicht durchaus gleichmässig, indem das

*) Medicinische Jahrbücher des österreichischen Staates. Bd. 6. Stück 2 Jahrg. 1820. S. 93.

Auge noch von Zeit zu Zeit an einzelnen schwach haften bleibt, und dadurch eine Retardirung der Scheinbewegung, aber keinen völligen Stillstand hervorbringt. Uebrigens scheinen die Umrisse der Gestalten in einander zu verfliessen, die Punkte ziehn sich in Linien, die Linien in Flächen nach den Gesetzen des geschwungenen Feuerbrandes. Die Farben werden matter, und es ist vorauszusehn, dass bei einer sehr schnellen, künstlich hervorgebrachten Drehung des Körpers um seine Axe die elliptische Fläche des Gesichtsfeldes sich in eine graue Cylinderfläche umwandeln müsste. Wenn man beim Sichdrehen gleich Anfangs die Augen fixirt, z. B. durch starres Anblicken eines nahe dem Auge gehaltenen Fingers, so vertritt dies die oben bemerkte krampfhafte Fixirung des Auges, und die sichtbaren Gegenstände drehen sich sogleich der Bewegung des Körpers gemäss, und ihre Bewegung wird nur dann wieder ungleichmässig, wenn man das fixirte Auge wieder frei lässt.«

»Wenn die relative Bewegung der Gesichtsgegenstände durch die Drehung hinlänglich eingeschwungen ist, und man hält stille, so zeigt sich nun die Schwindelbewegung, die bei näherer Betrachtung von der vorigen relativen durch Aenderung der Ortsverhältnisse hervorgebrachten wesentlich verschieden ist. Wenn jene nach einer und derselben Richtung ist, und immer ein neues Gesichtsfeld darbietet, so ist diese zwar auch nach derselben Richtung, aber bei einem und demselben Gesichtsfelde; es müssen also hier dieselben Gegenstände immerfort an ihren Ort wieder zurückkehren, werden aber immerfort nach derselben Richtung abgeleitet. Der Schwindelbewegung liegt also eine Oscillation zum Grunde, wie man dies schon am eigenen Auge durch leises Betasten, und an fremden augenscheinlich bemerken kann.«

»Man kann beim Stillestehn die Schwindelbewegung, wenn sie noch so heftig wäre, sogleich aufhalten, wenn man den nahe vorgehaltenen Finger mit den Augen fixirt. Dieser Umstand, so wie auch die tastbare und sichtbare Bewegung der Augäpfel bietet einen Weg dar, den Bedingungen des Augenschwindels auf die Spur zu kommen.«

»Der Augenschwindel ist nämlich zunächst bedingt durch einen Kampf bewusstloser unwillkührlicher Muskelactionen und willkührlicher bewusster nach der entgegengesetzten Richtung. Die erstere

wird als eine bewusstlose auf die Gegenstände übertragen, und es scheinen diese in Bewegung, indess nur der Augapfel sich bewegte; sie ist der passiven Bewegung des Augapfels, in die er durch einen Seitendruck mit dem Finger versetzt wird, und wobei die Gegenstände ebenfalls scheinbar bewegt erscheinen, ganz gleich zu achten. Wenn man nämlich z. B. einen Punkt mit Aufmerksamkeit fixirt, und drückt sanft mit dem Finger das Auge von irgend einer Seite, so rückt das Bild des Punktes aus dem Orte des deutlichen Sehens nach der entgegengesetzten Richtung; da aber die Aufmerksamkeit von dem Bilde willkührlich nicht abgewendet wurde, so wird es durch indirectes Sehen festgehalten, und, weil dem bewegten Bilde die Aufmerksamkeit folgt, so wird auch seine Bewegung bemerkt.«

Purkyně erwähnt hierauf Erscheinungen, welche auf das Plateau'sche Bewegungsnachbild zurückzuführen sind, und versucht dieselben ebenfalls durch unwillkührliche (»durch temporelle Eingewöhnung erworbene«) Augenbewegungen zu erklären. Wir haben schon gesehn, dass diese Erscheinungen durchaus anderer Natur sind. Nicht nur sind dieselben auf die durch die Bewegung afficirte Netzhautstelle beschränkt, sondern es tritt auch nie die Bewegung deutlich gesehener Objecte als Nacherscheinung auf. Es zieht vielmehr ein Schatten von Bewegung über die Objecte hin.

Breuer hat den Purkyně'schen Beobachtungen über die Augenbewegung neue wichtige Versuche hinzugefügt und wie mir scheint, die Purkyně'sche Theorie wesentlich verbessert. Er findet bei einer activen Umdrehung etwa ein zehnmaliges Rücken des Bulbus in der Drehrichtung, welches sich durch leises Betasten constatiren lässt. Der Bulbus bleibt also bei Kopfdrehungen anfangs zurück und rückt dann plötzlich nach. Von einem Fixirbestreben kann diese Augenbewegung nach Breuer nicht herrühren, denn sie lässt sich in gleicher Weise bei geschlossenen Augen und an Blinden beobachten. Auch von der Trägheit des Augapfels rührt sie nicht her, denn sonst müsste dieses Spiel mit dem ersten gewaltsamen Nachrücken ein Ende haben. Breuer hält diese »compensirenden« Augenbewegungen für reflectorisch ausgelöst. Ueber den Einfluss dieser Augenbewegungen auf die Gesichtswahrnehmungen sagt Breuer Folgendes:

»Dreht man nämlich den Kopf nicht zu rasch, so sieht man

bekanntlich die Objecte ruhig; sie scheinen aber die der Kopfdrehung entgegengesetzte Bewegung zu machen, wenn man die (offenen) Augen durch den aufgedrückten Finger fixirt und dadurch jene compensirende Bewegung hindert oder doch vermindert. Eben so sehe ich Nachbilder bei geschlossenen Augen und hin und her sich drehendem Kopfe, unverrückt ihren Ort bewahren; erzeuge ich mir dagegen durch Fingerdruck die Druckfigur, wobei natürlich der Bulbus fixirt wird, und drehe den Kopf, so macht die Figur alle Bewegungen desselben im Raume mit. (Nachbilder schwinden mir bei ordentlich fixirendem Fingerdruck zu rasch, als dass ich dies an ihnen beobachten könnte).«

»Auch das scheint mir ein Beweis dafür, dass die compensirende Bewegung eine active ist, dass bei sehr rascher Kopfdrehung die Objecte sich zu bewegen scheinen; bei rascher Bewegung kann sich nun zwar die compensirende Muskelaction nicht entwickeln, jenes zurückhaltende Drehungsmoment aber müsste dabei am stärksten wirksam sein; es müssten die Bulbi also dabei ruhig bleiben, aber eben da drehen sie sich mit dem Kopfe.«

»Habe ich auf das Helmholtz'sche Visirbrettchen ein vertical linirtes Papier befestigt und drehe nun, während die Zähne das Brettchen festhalten, den Kopf z. B. nach rechts, so machen die Linien eine scheinbare Bewegung eben dahin, während die momentan sichtbaren Nachbilder derselben, sich von ihnen abspaltend, am Platze zu bleiben scheinen.«

Breuer schöpft nun aus den Versuchen folgende Theorie des Augenschwindels. Bei der Uhrzeigerdrehung des Kopfes bleiben die Augen nicht vermöge der Trägheit und nicht durch ein Fixirbestreben, sondern durch eine reflectorisch (von den Bogengängen aus) erregte Muskelaction theilweise zurück, führen also eine langsame Gegenbewegung aus, worauf sie dann immer ruckweise der Bewegung des Kopfes folgen. In Folge dieses Zurückbleibens behalten die Bilder ihren Ort auf der Netzhaut und die Gesichtsobjecte ihre Stelle im Raume, während wir von den ruckweisen Bewegungen überhaupt keinen Gesichtseindruck erhalten. Nach längerer Dauer der Uhrzeigerbewegung hören nun die Bulbusbewegungen auf, die Augen bewahren ihre relative Lage gegen den Kopf und die Gegenstände scheinen nun vermöge der Verschiebung ihrer Bilder

auf der Netzhaut die entgegengesetzte Drehung auszuführen. Beim plötzlichen Anhalten der Uhrzeigerdrehung tritt die Bulbusbewegung wieder auf. Nun dreht sich aber der Bulbus langsam im Sinne des Uhrzeigers und kehrt ruckweise in umgekehrter Richtung zurück. Diese Bewegung lässt sich nun weder durch ein Fixirbestreben noch durch temporelle Eingewöhnung erklären, wie Purkyně will. Sie erklärt sich aber nach Breuer, wenn man beim Anhalten der Rotation denselben Reflexmechanismus und nach denselben Regeln als wirksam annimmt, wie beim Beginn der Drehung. Die Gegenstände scheinen nun bei der langsamen Bewegung des Bulbus im Sinne des Uhrzeigers vermöge der Verschiebung der Netzhautbilder eine langsame Gegendrehung auszuführen, während wir von der raschen Blickbewegung wieder keinen Gesichtseindruck erhalten. Daher scheinen beim Stehenbleiben alle Gegenstände sich dem Uhrzeiger entgegen zu drehn, ohne doch von der Stelle zu kommen, worin eben das Phänomen des Augenschwindels besteht. Erst in der Form, welche die Erklärung des Augenschwindels aus Augenbewegungen durch Breuer erhalten hat, scheint mir die Theorie annehmbar.

8.

Als ich meine erste Mittheilung über den Gegenstand dieser Schrift publicirte, hatte ich über den Augenschwindel eine andere Ansicht. Die Beschreibung, welche Helmholtz von dem Augenschwindel gegeben, schien mir den Thatsachen nicht zu entsprechen und seine Erklärung sehr gezwungen. Es war mir ferner schon aus frühern eigenen Untersuchungen bekannt, wie viel man aus Augenbewegungen zu erklären pflegte, was damit in gar keinem Zusammenhange steht, so z. B. das Plateau'sche Bewegungsnachbild. Ich hatte also von Anfang an die Vermuthung, dass der Augenschwindel nicht durch Augenbewegungen bedingt sei. In dieser Meinung wurde ich durch den Versuch bestärkt. In dem Papierkasten meines Rotationsapparates befand sich auf weissem Grunde ein schwarzes Kreuz, welches jede Blickschwankung durch ein scharfes Nachbild verräth. Wenn ich nun bei den Rotationsversuchen dies Kreuz fixirte, so erhielt ich keine von Blickschwankungen herrührenden Nachbilder und beobachtete gleichwohl die schon beschriebenen Phänomene des Augenschwindels. Ich kann

also nach meinen Erfahrungen nicht behaupten, dass beim Fixiren der Augenschwindel wegfällt. Freilich hat mich Herr Dr. Breuer brieflich aufmerksam gemacht, dass beim Fixiren der Augenschwindel doch schwächer wird und dass die nystagmatischen Bewegungen dann sehr klein und schwer beobachtbar werden können. Eine Abschwächung des Augenschwindels glaubte ich bei wiederholten Versuchen zuweilen wahrzunehmen, doch nicht immer. Ich will also nicht behaupten, dass die Breuer'sche Theorie unrichtig ist. Warum sie mir allein und ohne Modification nicht auszureichen scheint, will ich dann gleich angeben.

Die von Breuer beschriebenen nystagmatischen Bewegungen habe ich auf folgende Weise beobachtet. Mit einem Stückchen brennenden Magnesiumdraht erzeuge ich mir ein starkes und dauerndes Nachbild. Drehe ich mich nun activ (von oben gesehn) im Sinne des Uhrzeigers um die Körperaxe, so sehe ich wie das Nachbild immer auf einem Gegenstande hängen bleibt und dann plötzlich nachrückt. Die Augen drehn sich langsam dem Uhrzeiger entgegen und ruckweise dem Uhrzeiger nach. Diese Bewegung wird allmälig schwächer, bis endlich das Nachbild sich einfach mit dreht. Beim Stehnbleiben geht das Nachbild im Sinne des Uhrzeigers langsam über die Gegenstände hin und macht darauf immer ruckweise die verkehrte Bewegung. Die Gegenstände laufen hiebei der Uhrzeigerbewegung entgegen.

Führe ich nun im Papierkasten eine passive Drehung aus, so sind bei verschlossenen Augen die nystagmatischen Bewegungen heftig, wie man sich durch Betasten der Bulbi überzeugen kann. Bei offenen Augen fallen aber die Verschiebungen des Nachbildes im Kasten bei passiver Drehung sehr viel geringer aus als bei freier activer Drehung. Erzeuge ich, die Augen fixirend, bei passiver Drehung eine Druckfigur, so dreht sich diese wie bei Breuer auch bei mir mit. Ich fühle aber hiebei deutlich die Anstrengungen des Bulbus zu Bewegungen.

Es wäre nun sehr natürlich anzunehmen, dass jede Bewegung eines Bildes auf der Netzhaut, welche nicht durch eine bewusste Augenbewegung hervorgebracht ist, als Bewegung des Objectes im Raume gesehn wird. Allein aus den letzten Versuchen geht doch hervor, dass auch auf der Netzhaut ruhende Bilder bewegt erscheinen können.

Wie anders soll man es verstehn, wenn die Druckfigur des fixirten Auges sich mitdreht, wie ja auch Breuer beobachtet hat. Sollten die blossen Innervationen der Augenmuskel diese Bewegungsvorstellung zu Stande bringen? Ohne damit eine Erklärung geben zu wollen, glaube ich dies Verhältniss doch am besten so zu bezeichnen, dass ich sage, der optische Raum wird auf einen zweiten Raum bezogen, den wir aus unsern Bewegungsempfindungen construiren.

Dass die nystagmatischen Bewegungen des Auges bei Drehungen des Körpers nichts mit der Trägheit zu schaffen haben, wird noch durch folgenden Versuch klar. Wir setzen uns in den Papierkasten, welcher für sich in dem festgestellten Rahmen unseres Rotationsapparates leicht gedreht werden kann. Führt man nun die Umdrehung recht rasch aus, etwa eine in zwei Secunden, und blickt man mit den Augen, nachdem die Drehung gleichförmig geworden, rasch auf und ab, natürlich ohne den Kopf zu bewegen, so bemerkt man an den Wänden des Kastens gar keine Bewegung. Hiebei verhält sich aber das Auge wie eine Fessel'sche Schwungmaschine und es müssten folglich nicht beabsichtigte Augendrehungen und damit subjective Bewegungserscheinungen eintreten, wenn die Trägheit und leichte Beweglichkeit der Augen eben eine Rolle spielen würde.

9.

Wie es scheint, können also optische Empfindungen durch Bewegungsempfindungen modificirt werden. Umgekehrt werden aber auch Bewegungsempfindungen auf optischem Wege angeregt. Dies soll durch einige Experimente demonstrirt werden.

Versuch 1. Wir denken uns über dem Kopfe des Beobachters eine horizontale kreisförmige Holzscheibe von $1^1/_2{}^m$ Durchmesser auf einer nahe am Kopfe des Beobachters vorbeigehenden verticalen Axe drehbar. Um den Rand dieser Scheibe legen wir einen $^1/_2{}^m$ breiten Papierstreifen, welcher auf der Innenseite mit aequidistanten verticalen Linien überzogen wird. Der Beobachter sitzt also im Innern eines hohlen drehbaren linirten Cylinders. Wird diese Trommel allein einige Minuten lang in Drehung gehalten, so meint man bald, sich mit jenen Gegenständen, welche die Trommel nicht verdeckt, verkehrt zu drehen, bald glaubt man wieder zu ruhen, während die Trommel

sich dreht und beide subjective Zustände wechseln oft. Es schien mir bei mehrmaliger Wiederholung des Versuches, als ob der nicht fixirte Theil des Gesichtsfeldes am leichtesten in Bewegung gerathen würde. Dies würde einen guten Anhaltspunkt für die Erklärung der Erscheinung nach dem Breuer'schen Princip geben. Doch wird der subjective Vorgang kaum mit dem optischen Theil erschöpft sein. Ich kann mich wenigstens eines Bewegungsgefühls nicht erwehren.

In der manigfaltigsten Form sieht man solche Erscheinungen bekanntlich, wenn man auf einer Brücke über fliessendem Wasser steht oder von einem ruhenden Eisenbahnzuge aus mehrere bewegte beobachtet, wobei also das Gesichtsfeld in mehrere Theile von verschiedener Bewegung abgetheilt ist.

Versuch 2. Bringen wir die Papiertrommel in der angegebenen Weise über dem Beobachter im Rotationsapparat an. Setzen wir nun den Apparat mit geringer Beschleunigung in Drehung, so bleibt die Trommel wegen der Reibung in relativer Ruhe gegen den Apparat. Halten wir dann den Apparat plötzlich an, so behält die Trommel nach dem Princip der Erhaltung der Flächen, ihre Endwinkelgeschwindigkeit bei, welche sie nur allmälig verliert. Der Beobachter hält dann die bewegte Trommel für ruhend und sich selbst fühlt er in desto schnellerer Gegendrehung. Drehte sich der Apparat anfänglich, von oben gesehn, wie der Uhrzeiger, so meint der Beobachter nach dem Anhalten sich und alle festen Gegenstände verkehrt wie den Uhrzeiger gedreht zu sehn, mit Ausnahme der Trommel, welche sich wirklich wie der Uhrzeiger dreht und die zu ruhen scheint. Die scheinbare Bewegung lässt sich also durch eine wirkliche compensiren. Verliert die Trommel ihre Geschwindigkeit zu rasch, so nimmt sie dann an der Scheinbewegung des Beobachters Theil. Es liesse sich so die Intensität und Nachdauer der Scheinbewegung messen. Merkwürdig ist, dass bei diesem Versuch das gewaltige Ekelgefühl, welches der Sistirung starker Rotationen zu folgen pflegt, nicht eintritt.

Versuch 3. Die Compensation einer subjectiven Bewegung durch eine objective ist ein specieller Fall der Zusammensetzung beider Bewegungsarten, von welcher hier ein Beispiel folgen mag. Wenn man im vorigen Versuch bei der Drehung den Kopf auf die Brust vorneigt und nach dem Anhalten des Apparates

aufrichtet, so combinirt sich die wirkliche Axendrehung der Trommel um eine Verticalaxe mit der subjectiven des Beobachters um eine Horizontalaxe zu einer Drehung um eine schief liegende Axe. Auch die Ergebnisse der Versuche 2 und 3 lassen sich vielleicht ganz oder theilweise nach dem Purkyně-Breuer'schen Princip erklären.

10.

Wir können hier nicht die von Hitzig beim Galvanisiren des Kopfes beobachteten Augenbewegungen übergehn. Die Beschreibung möge mit seinen eigenen Worten folgen.

»Ihrem Character nach sind die so an Gesunden hervorgebrachten Bewegungen fast immer associirte und lassen sich am Besten mit der Nystagmus genannten Affection vergleichen. Nur unterscheidet man hier immer deutlich, namentlich bei geringeren Stromintensitäten, eine schnell ruckartig ausgeführte Bewegung nach der einen Seite und eine langsamere nach der andern Seite. Bei manchen Individuen gleicht unter einer bestimmten Reizgrösse die Iris dem Schwimmer eines Angelfischers, der langsam auf einem Flusse dahintreibt, bis er plötzlich an der Leine in entgegengesetzter Richtung zurück gerissen wird. Bei zunehmender Stromintensität wird der Rhythmus schneller und schneller, bis endlich die Richtung der kurzen ruckenden Bewegung dominirt und der Bulbus bei sehr starken Strömen nur noch leise oscillirend im Augenwinkel festgehalten wird.«

»Die Richtung der einzelnen Bewegungen — und dies ist einer der interessantesten Punkte der ganzen Frage — hängt derart von der Wahl der Einströmungsstellen ab, dass die schnellere ruckende Bewegung, die wir der Einfachheit wegen zunächst allein berücksichtigen werden, immer in der Richtung des positiven Stromes erfolgt, die langsamere in der entgegengesetzten Richtung. Wenn sich also die Anode in der rechten und die Kathode in der linken Fossa mastoidea befindet, so erfolgt der Ruck nach links, und bei starken Strömen werden beide Bulbi in den linken Winkeln festgehalten.«

Wie man sieht, sind diese Augenbewegungen dieselben wie die beim Drehschwindel beobachteten, und es liegt die Vermuthung nahe, dass die durch den Strom hervorgebrachte Bewegungsempfindung sie auslöst. Breuer führt auch diese Bewegungen auf Reizung der Bogengänge zurück. Gesetzt aber es wäre auch bewiesen, dass die

Bogengänge Endorgane für die Bewegungsempfindung sind, so könnte doch nicht bezweifelt werden, dass alle Vorgänge, welche von den Endorganen aus erregt werden können, auch durch directe Affection des Centralorgans entstehen können. Eine solche Affection des Centralorgans hält nun Hitzig für die Ursache der Augenbewegungen und sie lässt sich bei der Form des Versuches wenigstens nicht ausschliessen. Anderseits werden beim Flourens'schen Versuch ganz ähnliche Augenbewegungen erregt und die Breuer'sche Ansicht erhält dadurch eine gute Stütze. Die Frage kann, wie ich glaube, noch nicht entschieden werden.

11.

Ich habe schon auf die Schwierigkeit hingewiesen, der man bei dem Versuch begegnet, alle optischen Scheinbewegungen aus Augenbewegungen zu erklären. Einen Einblick in diese Schwierigkeit wird man noch durch folgende Beobachtungen erhalten, welche in der hier beschriebenen Form fast gleichzeitig von Rollmann und mir*), in anderen Formen aber wohl wiederholt schon viel früher gemacht worden sind. Wenn man das Kantengerüst eines Würfels aus Draht, wie es Plateau zur Darstellung seiner Gleichgewichtsgestalten der Flüssigkeiten benutzt, monocular betrachtet, so steht es frei, die Ecke *a* als eine convexe oder concave zu sehn. Denn das monoculare Netzhautbild ist ein perspectivisches Bild, welches eine verschiedene Auslegung zulässt. Stellt man sich an dem Durchschnittspunkt *s* die Kante *ab* näher vor als *cd*, so erscheint *a* als convexe, im umgekehrten Fall als concave Ecke. Wenn nun *a* in Wirklichkeit z. B. eine convexe Ecke ist, während man es als eine concave sieht, wenn man also das Bild invertirt, was besonders leicht bei einem schwarzen Drahtgerüst vor einem hellen Grund gelingt, so sieht man jede

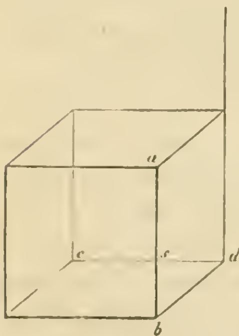


Fig. 16.

* Mach, Beobachtungen über monoculare Stereoscopie. Sitzgsber. d. Wiener Akad. Bd. 58.

Drehung, die mit dem Drahtkörper vorgenommen wird, verkehrt vor sich gehn. Dies bedarf keiner besondern Erklärung.

Ueberraschend ist aber folgende Erscheinung. Man lege ein Plateau'sches Netz auf den Tisch, betrachte es monocular und bewege den Kopf hin und her, etwa von rechts nach links. Das Netz erscheint fest und unbeweglich. Invertiren wir aber das Netz, so scheint es bei jeder Bewegung des Kopfes eine Drehung auszuführen. Noch hübscher ist die Erscheinung, wenn man zwei Netze mit den Stielen verbindet, auf den Tisch legt und das eine invertirt. Der invertirte Theil dreht sich mit dem Kopfe des Beobachters, der andere liegt ruhig.

Dies scheint nun desshalb sehr merkwürdig, weil es zeigt, welcher exacte Connex der Gesichtswahrnehmungen mit den leisesten Bewegungen des Körpers, namentlich des Kopfes besteht. Beide Bilder auf der Netzhaut verändern sich, doch wird nur die eine Veränderung als Bewegung gesehn. Die Augenbewegungen haben an der Erscheinung keinen Antheil. Nicht nur, dass die Augen bei der beschriebenen Bewegung des Kopfes keinen Anlass haben, eine merkliche Drehung auszuführen, man kann sich auch durch Bewegung des Bulbus mit dem Finger überzeugen, dass bei dieser das ganze monoculare Bild verschoben, der Gegenstand aber, wie natürlich, nicht gedreht erscheint. Die verschiedenen Theile des Netzhautbildes erfahren hier eine ungleiche Verschiebung und bei Auslegung dieser Verschiebung wird nicht die Augen-, sondern die Kopfbewegung in Rechnung gezogen.

Bei ruhigem Kopfe und ruhigem Bulbus sieht man die Verschiebung des Netzhautbildes in einem bestimmten Sinne als eine desto grössere entgegengesetzte Raumverschiebung, in je grössere Ferne man das Object versetzt. Wird aber gleichzeitig der Kopf im Sinne der Bildverschiebung bewegt, so wird ein desto kleinerer Bruchtheil der Kopfverschiebung von der Objectverschiebung in Abzug gebracht, in je grössere Ferne man das Object setzt. Ein Netzhautbild kann also gewisse Veränderungen erfahren, ohne dass daraus die Wahrnehmung eines veränderten Objectes hervorgeht. Es sieht fast wieder so aus, als ob es einen besonderen Vorstellungsraum gäbe, der von dem Sehraum verschieden ist. Darauf würde auch der Umstand deuten, dass man sich leicht ein Spectrum oder sonst

ein Object hinter dem eigenen Rücken vorstellen kann, wohin doch das Gesichtsfeld nie reicht.

Alles zusammengefasst sehen wir, dass die Phänomene des Augenschwindels sich durch Augenbewegungen erklären lassen, welche reflectorisch durch die Bewegungsempfindungen ausgelöst werden. Daneben bleiben aber einzelne Erscheinungen übrig, auf welche jene Erklärung nicht anwendbar scheint.

12.

Da man, wie wir gleich sehn werden, nachweisen kann, dass die Quelle der Bewegungsempfindungen, namentlich derjenigen, welche den Drehschwindel bedingen, im Kopfe liegt, so verfällt man leicht auf den Versuch, alle diese Empfindungen aus einer directen Affection des Gehirns bei Bewegungen abzuleiten. Diesen Versuch hat schon Purkyně gemacht, indem er sagt:

»Bei den Drehungen des Körpers um die Längenaxe muss nothwendig das Gehirn, da es weich ist, in seiner Bewegung gegen die Bewegung der Hirnschale momentan zurückzubleiben die Tendenz haben, so wie wir dies an einer Flüssigkeit bemerken, deren Gefäss gedreht wird. Die Theile der Flüssigkeit behaupten ihre Lage gegen den äussern Raum so lange, bis sie vermöge der Adhäsion an den Wänden des Gefässes in dessen Bewegung allmälig mit fortgerissen werden. Dasselbe kann nun im Gehirn nicht stattfinden, da seine Cohäsion dafür zu gross ist; da es jedoch eine weiche, in sich bis auf einen gewissen Grad verschiebbare Masse darstellt, die in dieser Hinsicht an den Eigenschaften des Flüssigen participirt, so muss man nothwendig annehmen, dass in dem Grade, als es von aussen in mehr oder weniger heftige Bewegung versetzt wird, auch seine Theile gegeneinander, wenn gleich ohne Continuitätsveränderung in gleichem Grade verschoben und gedehnt werden. Solche Zerrungen mögen dann ähnliche Wirkungen hervorbringen, wie wirkliche mechanische Läsionen, die dann von dieser nur graduell verschieden sein werden. Ich wäre geneigt zu glauben, dass den Versuchen an Thieren gemäss auch hier zunächst die Affectionen des kleinen Gehirns und der Schenkel des grossen jene Wirkungen

hervorbringen, indessen die dabei stattfindende Betäubung dem grossen Gehirne zuzueignen wäre.«

An einer andern Stelle wird diese Vorstellung noch weiter ausgeführt:

»Für unsern Zweck ist es hinlänglich, sich vorzustellen, dass das Gehirn bei anhaltenden heftigeren Bewegungen nach einer oder mehreren zurückkehrenden Richtungen eine Abänderung in seiner Cohäsion erleide, dass seine Theile, wenn nicht in eine wirkliche Bewegung, doch in eine Bewegungstendenz nach einer oder mehreren Seiten versetzt werden, welche Bewegungstendenz nach vorhergegangener realer Bewegung noch einige Zeit nachbleibt und Ursache des Schwindels ist. Daher die Richtung der Schwindelbewegung von der Richtung abhängt, in welcher die Schwungkraft auf das Gehirn eingewirkt hat. Die Cohäsion sowohl, als die Bewegungstendenz, ist eine mehr oder weniger innige Wechselberührung der Massentheilchen; durch sie kömmt das Gehirn in Selbstberührung. Dieses ist aber ein Empfindendes: die vermehrte Selbstberührung wird also als Empfindung ins Bewusstsein treten. Zwar wird in den gewöhnlichen Stellungen und Bewegungen des Körpers die Einwirkung der Schwere in jedem Theile immer fort empfunden, und diese Empfindung dient als Regulativ der Bewegungen und der Erhaltung des Gleichgewichts des Körpers; wenn aber die Schwere in irgend einem Theile, vorzüglich im Kopfe, als dem edelsten, dem aller Instinct des übrigen Körpers dient, eine andere Richtung erhält, so kömmt der Instinkt des ganzen Muskelsystems in Aufruhr, und bringt bewusstlose Bewegungen hervor, die die normale Lage des Kopfes herstellen, seine scheinbare Bewegung zum Stillstande bringen sollen. Daher die jedesmalige Bewegung des Tastschwindels durch die Scheinbewegung des Hirnschwindels bedingt ist. Dass die Scheinbewegung als objectiv erscheint, kömmt bloss von der Unwillkührlichkeit der Tastbewegungen, die, weil sich für dieselben keine subjectiven Gründe im Bewusstsein finden lassen, ins Objective übertragen werden.«

Nach Purkyně empfindet also das Hirn die Bewegungstendenz, welche es erhält, als eben diese Bewegungstendenz. Diese Ansicht hat etwas Primitives an den Standpunkt der Jonischen Schule erinnerndes, wie wir es übrigens im Gebiete der Sinnes-

physiologie bei dem genialen Purkyně wiederholt antreffen. Sie beruht auf einer Verwechslung der Empfindung mit den Mitteln, durch welche die Empfindung erregt wird. Beide sind ja, so viel wir sehen, grundverschieden. Eine andere Frage ist die, ob nicht Organe der Bewegungsempfindung im Hirn durch die Kopfbewegungen selbst zu der ihnen eigenthümlichen Thätigkeit erregt werden. Diese Frage kann discutirt werden.

Die durch Purkyně angeregte Auffassung hat sich in mehr oder weniger modificirter, meist in sehr unbestimmter Form bis auf den heutigen Tag erhalten. Sie ist in sehr wissenschaftlicher Weise von Hitzig vertreten, der neue experimentelle Stützen für dieselbe beigebracht, und von Wundt*) acceptirt worden.

Wenn man auch zugibt, dass alle Empfindungen und Vorstellungen, welche von den Endorganen aus auslösbar sind, auch im Centralorgan entstehn können, was ich gar nicht in Abrede stellen will, so wird man doch die Wundt'sche Erklärung, nach welcher der Drehschwindel durch eine »Functionsstörung des Kleinhirns« bedingt ist, nicht für befriedigend halten. Man wird ferner Mühe haben, sich eine bestimmte mechanische Vorstellung von dem Vorgange zu machen, den Wundt**) mit den Worten meint: »In Folge der Drehbewegung wird das Cerebellum durch die Centrifugalkraft einen Druck nach der Seite der Drehung erfahren« . . . . . Bei dem complicirten Bau des Kleinhirns muss es als sehr unwahrscheinlich angesehn werden, dass die Winkelbeschleunigung um irgend eine durch das Kleinhirn gehende Axe immer die Empfindung einer Drehung um dieselbe Axe auslöst. Wie eigenthümlich müsste das Kleinhirn gebaut sein, wenn es auf mechanischen Druck so reagiren sollte.

Dass Druck auf das Gehirn bei den gewöhnlich vorkommenden Progressiv- und Winkelbeschleunigungen eine Rolle spielt und die Bewegungsempfindungen auslöst, ist mir, abgesehn von der Unbestimmtheit der Ableitungen, die man in dieser Richtung versucht hat, durch die Experimente unwahrscheinlich. Die Winkelbeschleunigung des Hirns bleibt allerdings dieselbe, ob sich in meinem Ap-

*) Physiologische Psychologie. Leipzig 1874. S. 208.
**) a. a. O. S. 211.

parate der Kopf in oder ausser der Rotationsaxe befindet. Allein der von der Centrifugalbeschleunigung abhängige Druck ändert sich wesentlich, wenn man aus der Axe tritt. Mir ist aber hiebei, so wie bei andern Lagenänderungen des Kopfes keine wesentliche Aenderung der Erscheinung aufgefallen. Gewisse mir wenigstens sehr unbestimmt erscheinende und schwer zu beschreibende Druckgefühle im Kopfe mögen sich aus der directen Affection des Gehirns ableiten lassen, schwerlich aber die eigenthümlichen Raumvorstellungen, die durch die Bewegung erregt werden.

Hitzig*) hat durch mehrere Versuche dargethan, dass directe Erregung des Hirns Schwindelzufälle hervorbringen kann. Wir wollen Beispiele anführen.

»Wenn man dem Kaninchen das Hinterhaupt eröffnet und ihm den kleinen Seitenlappen des Kleinhirns exstirpirt, der der Flocke beim Menschen entspricht, so bleibt eine, von dem beim Kaninchen verknöcherten Tentorium gebildete Höhle zurück, in die der Flockenstiel hineinragt. Bringt man nun in diese Höhle einige Fragmente Eis, oder spritzt vorsichtig kaltes Wasser hinein, so richtet sich das Thier plötzlich auf, macht ähnliche wackelnde Bewegungen mit dem Kopfe, manchmal auch mit dem Körper wie nach den Drehversuchen, und stürzt dann auf die entgegengesetzte Seite, während sich nun beide Augen unter heftigem Nystagmus in die Winkel der verletzten Seite stellen. Eine Weile bleibt es so liegen, dann springt es plötzlich wieder auf, und sitzt ruhig da, als wenn ihm nichts geschehen wäre.« . . . .

»Endlich nehme ich noch eine lange Reihe von Verletzungs-, Durchschneidungs- und Exstirpationsversuchen am Kleinhirn vor, deren Gesammtresultat zur fernern Aufklärung des Sachverhaltes wesentlich beiträgt. Wenn tiefgehende Schnitte die eine Hemisphäre der Art trennten, dass ihre Verbindungen mit dem mittleren und hinteren Schenkel zum grösseren Theile unterbrochen sein mussten, so entstand dasselbe Bild, wie bei starker galvanischer Reizung, die Thiere rotirten mit rasender Vehemenz nach der verletzten Seite.«

Ohne Zweifel lassen sich also durch allgemeine oder locale Aen-

---

*) Untersuchungen über das Gehirn. Berlin 1874. S. 264.

derung der Zustände des Kleinhirns Schwindelerscheinungen hervorbringen. Dies hat nichts Befremdendes. Dass aber das Kleinhirn jede Winkelbeschleunigung um eine Axe als Drehung um dieselbe Axe empfinden soll, ist a priori so unwahrscheinlich, dass es ohne sehr stichhaltige Beweise nicht angenommen werden kann. Mit gleichem Rechte könnte man erwarten, das mit einer Linse auf die Hirnoberfläche entworfene Bild werde deutlich gesehen.

Die Mitbetheiligung der directen Hirnerregung bei den Erscheinungen des Drehschwindels lässt sich zwar nicht absolut ausschliessen, kann aber auch, wenn sie angenommen wird, die Details der Erscheinungen nicht erklären.

13.

Der Sitz des Organs der Bewegungsempfindungen im Kopfe wird eigentlich schon durch den Versuch Purkyně's mit der Veränderung der Kopfstellung nach Unterbrechung der Rotation dargethan. Man kann aber gegen die Beweiskraft des Versuches Einwendungen erheben. Man kann z. B. daran denken, dass bei Beschleunigungen des Körpers die Halsmuskel den Kopf in der Lage zu erhalten haben und dass auch nach veränderter Kopfstellung die betreffenden Muskelempfindungen in modificirter Weise fortbestehn. Ist diese Auffassung auch eine gezwungene, so kann sie doch auftreten. Desshalb schien es mir gut, den Einfluss der Kopfstellung auf die Schwindelphänomene noch genauer zu constatiren.

Versuch 1. Wir setzen uns in den Rotationsapparat, befestigen auf dem Kopfe eine vierkantige Holzkappe und bringen diese in eine Führung aus zwei Brettern, so dass der Kopf bei fest angelehntem Rücken nur vor- und rückwärts geneigt, aber weder sonst wie gedreht noch seitwärts geführt werden kann. Setzt man nun den Apparat in Rotation, so treten bei Kopfneigungen sowohl während der Rotation als nach Beendigung derselben die bei den früheren Versuchen beschriebenen subjectiven Erscheinungen eben so deutlich auf, wie wenn der Kopf frei beweglich wäre.

Versuch 2. Wir setzen auf den Kopf eine vierkantige Holzkappe, an welcher die beiden Seitentheile rechts und links fast bis zu den Schultern herabreichen. Dann setzen wir uns auf einen Stuhl

den Rücken fest anlehnend und führen Neigungen des Kopfes nach vorn und rückwärts aus. Mit Hilfe eines Bleistiftes, den man an die Seitentheile so setzt, dass derselbe keinen Bogen bei den Kopfneigungen schreibt, sondern auf dem Holz nur eine kleine Stelle markirt, findet man leicht die Durchschnittspunkte der Drehungsaxe des Kopfes mit den Wänden der Holzkappe. Nun wird die Kappe oben am Rahmen *r* (Fig. 7) befestigt und der Stuhl um die Axe des Kopfes im Rahmen *r* beweglich gemacht. Der Beobachter setzt sich nun auf den Stuhl und keilt den Kopf fest in die Kappe ein. An dem Stuhle wird ein Stab angebracht, durch welchen ein Gehilfe, der gegenüber auf einem Sitze in dem Rahmen *R* Platz nimmt, den Stuhl in Schwingungen versetzt. Versetzt man nun den Rotationsapparat in Bewegung und zugleich den Stuhl mit dem Körper des Beobachters in heftige Schwingungen, während der Kopf des Beobachters ruhig bleibt, so bemerkt man nichts von den Erscheinungen, welche bei Bewegung des Kopfes aufzutreten pflegen. Ebensowenig treten nach dem Anhalten der Rotation beim Schwingen des Stuhles solche Erscheinungen auf. Bei diesem und dem vorigen Versuch sind die Relativbewegungen von Kopf und Rumpf dieselben. Die Muskel haben also in beiden Fällen dieselbe Verrichtung. Wenn nun dennoch bei blosser Bewegung des Körpers gar nichts Auffallendes eintritt, bei blosser Bewegung des Kopfes aber alle bekannten Erscheinungen sich zeigen, so scheint mir damit der Sitz des Organs der Bewegungsempfindungen im Kopfe nachgewiesen.

Von der Kopfstellung hängt nicht nur die Lage der Axe der subjectiven Drehung, sondern, wie schon erwähnt wurde, auch die Art des Augen- und Tastschwindels ab. Beide werden von Purkyně erklärt durch unbewusste Fortsetzungen der durch temporelle Eingewöhnung erworbenen Augen- und Muskelbewegungen, deren Effect, weil er eben unbewusst hervorgebracht ist, den Objecten zugeschrieben wird. Ein Object, dessen Bild sich auf der Netzhaut des unbewusst bewegten Auges verschiebt, wird für bewegt gehalten. Von einem Gegenstande, den wir unbewusst mit unsern Armen heranziehen, meinen wir, dass er gegen uns heran stürzt. In der That weiss man, dass bei Bewegung des Augapfels durch eine fremde äussere Kraft die Gegenstände bewegt erscheinen, und man kann, abgesehn von den prickelnden Hautempfindungen, dem Tastschwindel

durchaus ähnliche Erscheinungen hervorrufen, wenn man etwa die Hand auf den Tisch stützt und nun den Arm mit Inductionsströmen behandelt. Letzteres Experiment habe ich angestellt. Die Annahme von unbewussten Bewegungen ist also sehr gut zur Erklärung der Erscheinungen brauchbar.

Die Breuer'sche Annahme aber einer reflectorischen Auslösung der unbewussten Bewegungen von einem Organ der Bewegungsempfindungen aus, die auch Purkyně vorübergehend macht, empfiehlt sich sehr gegenüber der Annahme der temporellen Eingewöhnung. Der Schwierigkeit ist schon gedacht worden, die Augenbewegungen im Detail durch temporelle Eingewöhnung zu erklären. Die Umkehrung des Sinnes der ruckenden Augenbewegung beim Beginn und Ende der Rotation gibt der Breuer'schen Ansicht den entschiedenen Vorzug.

Dass die Scheinbewegung des Augenschwindels von der Kopfstellung abhängt, kann nicht auffallen, indem die Augen im Ganzen ihre Relativstellung gegen den Kopf beibehalten. Dagegen ist es schwerer verständlich, wie so die Art des Tastschwindels von der Kopfstellung afficirt wird. Wenn die angefassten Gegenstände, oder die Gegenstände auf die wir uns stützen, aus einer horizontalen in eine verticale Drehung gerathen, sobald wir die Lage des Kopfes ändern, so kann gewiss nicht von einer Wirkung der temporellen Eingewöhnung der Muskelbewegung die Rede sein. Allein auch der Reflexmechanismus ist sehr merkwürdig, der von der Aenderung der Kopfstellung so rasch und sicher Notiz nimmt. Wenn man nach dem Anhalten der Rotation bei unveränderter Kopfstellung die Lage der Extremitäten, auf die man sich stützt, sehr rasch und sehr bedeutend abändert, so gelingt es mir wenigstens nicht, hiebei eine Aenderung der Drehbewegung an den erfassten Gegenständen wahrzunehmen. Soll also diese Theorie auf Vollendung Anspruch machen, so muss einmal auch aufgeklärt werden, wie so die unbewussten Muskelerregungen nicht nur von der Kopfstellung, sondern auch von der Stellung der Glieder abhängen.

Theorie der Erscheinungen.

1.

Die Theorie der Bewegungsempfindungen zu der ich gelangt bin, und die vorläufig und kurz schon angegeben wurde, ist ausserdem noch von zwei andern Forschern aufgestellt worden. Um den Grad der Uebereinstimmung und zugleich die Differenzpunkte ersichtlich zu machen, will ich ausser dem Auszuge, den ich meiner ersten an die Wiener Akademie gesandten Arbeit beigegeben habe, auch die vorläufigen Anzeigen von Breuer und Brown hieher setzen.

Sitzung der Wiener Akademie vom 6. Nov. 1873.

Das c. M. Herr Prof. E. Mach in Prag übersendet eine Abhandlung: »Physikalische Versuche über den Gleichgewichtssinn des Menschen«.

Aus zahlreichen Versuchen, die Mach an sich selbst angestellt hat, zieht er den Schluss, dass man die Flourens'schen Dreherscheinungen, die Orientirung des Gleichgewichtes und der Bewegung, die gewöhnlichen Erscheinungen des Drehschwindels, die Goltz'schen Phänomene und einige optische Bewegungserscheinungen aus einem Gesichtspunkt begreifen kann, wenn man annimmt, dass die Nerven der Ampullen der Bogengänge des Ohrlabyrinthes jeden Reiz (welcher gewöhnlich durch ein Drehungsmoment an dem Inhalt des Bogenganges ausgeübt wird) mit einer Drehempfindung beantworten.

Sitzung d. k. k. Gesellschaft der Aerzte in Wien vom 14. November 1873.

Dr. J. Breuer bittet, die wichtigsten Resultate einer Arbeit: »Ueber die Bogengänge des Labyrinths«, über welche er nächsten Freitag ausführlich zu referiren hofft, schon im diesswöchentlichen Anzeiger veröffentlichen zu dürfen. Da Herr Prof. E. Mach in der letzten Akademiesitzung eine Abhandlung über denselben Gegenstand vorgelegt hat, und, soweit aus einer kurzen publicirten Note zu ersehen, zu denselben Resultaten gelangt wie Dr. B., erscheint es diesem wünschenswerth, durch möglichst rasche Publication die Unabhängigkeit seiner Arbeit zu constatiren. Er erbittet aus diesem Grnnde die Erlaubniss zu der folgenden vorläufigen Mittheilung:

Angeregt durch die Abhandlung von Goltz über die Bogengänge (Arch. f. Physiol. 1870.) beschäftige ich mich seit geraumer Zeit mit diesem Gegenstande. Ich halte mich überzeugt, dass Goltz einen nicht bloss neuen, sondern auch durchaus richtigen Satz aufgestellt hat mit der Annahme, die Bogengänge seien »Sinnesorgane für das Gleichgewicht des Kopfes und mittelbar des ganzen Körpers«. Ich glaube, dass dies das Lösungswort des Räthsels ist, aber auch, dass die Vorstellung von den Functionen des Apparates, wie sie Goltz gibt, kaum haltbar sei. Ich versuche im Folgenden in möglichster Kürze eine andere Vorstellung zu entwickeln und auf ihre Richtigkeit und Fruchtbarkeit zu prüfen.

In einem Systeme von drei annähernd aufeinander senkrecht stehenden, mit Flüssigkeit erfüllten Röhrenringen, wie es die Bogengänge darstellen, entstehen

bei jeder drehenden Bewegung des ganzen Systems (des Kopfes) Strömungen der Flüssigkeit, in einer der Kopfdrehung entgegengesetzten Richtung; das Ausmaass der Strömung in jedem einzelnen Gang hängt von der Ebene ab, in welcher der Kopf gedreht wird, und von dem Ausmaass der Drehung. Zwischen der Kopfdrehung und den Strömungen der eingeschlossenen Flüssigkeit bestehen ganz feste Beziehungen; würden die Strömungen percipirt, so könnten sie also über jede Drehung des Kopfes genaue Auskunft geben. Als mögliche Perceptions-Apparate stellen sich unserer Betrachtung die »Hörhaare« dar, welche an einer verbreiterten und abgeplatteten Stelle des Canals senkrecht in das Lumen hineinragen, also möglichst empfindlich gegen Flüssigkeitsströmungen placirt sind und anderseits mit Nerven zusammen hängen, deren Endorgan sie bilden. In ganz analoger Weise scheinen die ganz analogen Nervenendapparate in den »Seitenorganen« der Fische zur Perception der Strömungen, Widerstände u. s. w. des umgebenden Wassers zu dienen. (F. E. Schulze.)

Wollen wir diese beiden Thatsachen im Sinne der Goltz'schen Theorie verwerthen, so müssen wir annehmen, dass jede Strömung der Endolymphe, durch die Ampullennerven percipirt, die Vorstellung einer Drehung des Kopfes in der Ebene des betreffenden Bogenganges und in der jener Strömung entgegengesetzten Richtung hervorrufe, dass aber die Perceptionen der 6 Ampullen beider Labyrinthe sich zu einer Gesammtvorstellung combiniren.

Für diese Annahme sprechen:

1. Die Erwägungen, welche nach Goltz überhaupt dafür sprechen, dass die Bogengänge Organe des Gleichgewichtssinnes sind.

2. Erklärt diese Annahme die Erscheinungen bei Verletzung der häutigen Canäle. Dabei tritt immer Endolymphe aus oder Blut ein, oder es geschieht beides, und es müssen dadurch relativ gewaltige Strömungen der Endolymphe entstehen. Diese Strömungen erzeugen unserer Annahme nach die Vorstellung von Drehung des Kopfes in der Ebene des verletzten Canals (wenn auch solches intensive Strömen secundär in andere Bogengänge übergreifen und dadurch die Erscheinungen compliciren wird). Aus Erfahrung am Menschen wissen wir, dass stärkere Drehungen des Körpers (Umstürzen) durch energische compensirende Bewegungen reflectorisch beantwortet werden. Die Thiere werden also Kopf und Körper in der Ebene des verletzten Bogenganges bewegen, bis zum Ueberkugeln. Sind die Bewegungsantriebe mässiger, so werden sie immer wieder durch corrigirende Einflüsse aufgehoben, um sogleich wieder zu beginnen und jenes Pendeln des Kopfes, und den Nystagmus der Augen herzustellen, welche die Flourens'schen Versuche zeigen. Für jene Erscheinungen, die nach Verheilung der Wunden fortbestehn, müssen wir uns, da die Betrachtung des Apparates in diesem Sinne ja eben erst begonnen wird, und bei dem Mangel an genauen Sectionsbefunden, mit der Goltz'schen Erklärung begnügen, ohne ins Detail gehen zu können.

Den bekannten Versuchen habe ich hinzuzufügen, dass Strömungen der Endolymphe, erzeugt durch Einstechen und Ausziehen einer Nadelspitze in einen Canal, mit entgegengesetzten Bewegungen beantwortet werden (Hühner, Tauben); ebenso wenn es, allerdings nur für kurze Zeit, gelang, eine Canüle in einen Gang zu fixiren, das Ansaugen und Wiedereintreiben der Endolymphe durch diese.

3. Erklären sich die in letzter Zeit von Hitzig wieder genau beobachteten

Phänomene des electrischen Schwindels. Es werden eben die Endapparate des Gleichgewichtssinnes durch den Strom afficirt. Schon dass diese desto intensiver werden, je näher die Electrode dem Proc. mastoid. steht, macht es wahrscheinlich, dass es sich dabei um die Reizung eines im Felsenbein befindlichen Organs handelt. Ich habe feinen Draht als Electrode in die Bogengänge eingeführt, und bei Durchleitung galvanischer Ströme intensive Bewegungen des Kopfes gesehen.

4. Unsere Annahme hat eine nothwendige Consequenz. Bei fortgesetzter Drehung des Kopfes (natürlich mit dem Körper) muss die anfängliche rückläufige Bewegung der Endolymphe durch die Reibung an den Wänden aufgezehrt werden. Steht dann plötzlich der Kopf still, so muss die Endolymphe ihrem Beharrungsvermögen zufolge in dem Sinne der Kopfdrehung weiter strömen; es muss also die Vorstellung entstehn, Kopf und Körper würden in einer der früheren Drehung entgegengesetzten Richtung zurückgedreht; und zwar in der Ebene jener Bogengänge, welche am meisten in der Drehungsebene lagen. Rotire ich auf meinen Füssen stehend um mich selbst, so liegen bei gewöhnlicher Kopfhaltung die horizontalen, bei Neigung des Kopfes auf die eine oder andere Schulter die sagittalen, war das Gesicht nach oben oder abwärts gerichtet, die frontalen Bogengänge vorwiegend in der Drehebene. Es wird also die scheinbare Nachbewegung des Körpers das eine Mal in horizontaler, das andere Mal in sagittaler oder frontaler Richtung geschehen. Das ist nun das von Purkynè aus seinen und des ältern Darwin Versuchen abstrahirte Gesetz: »Dass der Durchschnitt des Kopfes (als eine Kugel), um dessen Achse die erste Bewegung geschah, die Schwindelbewegung bei jeder nachmaligen Lage des Kopfes unveränderlich bestimmt.« Diese bisher so gut wie ganz unerklärten Phänomene des Drehschwindels ergeben sich so als die nothwendigen Consequenzen unserer Annahme und bilden die Probe auf die Rechnung. — Die Complication der einfachen Empfindung von Drehung des Körpers durch die eintretenden Reflexbewegungen zur Erhaltung des Gleichgewichtes und die Phänomene des Augenschwindels erfordern eine ausführlichere Betrachtung.

5. Die teleologische Bedeutung des Apparates für uns würden wir schon darin befriedigend finden, dass er so präcise und energische Reflexactionen möglich macht, wie die sind, die beim Ausgleiten z. B. die Balance erhalten. Andere Betrachtungen weisen aber noch auf eine hievon verschiedene Beziehung hin.

Kopfdrehungen werden durch compensirende Bulbusdrehungen beantwortet. Gräfe (Arch. f. Ophthalm. I.) hat gezeigt, dass bei Kaninchen, wenn sie in sagittaler Richtung (um ihre Querachse) gedreht werden, compensirende Raddrehungen der Bulbi auftreten. Dasselbe hat für frontale Verschiebungen des Kopfes, allerdings in geringerem Ausmaasse, Nagel beim Menschen nachgewiesen, nachdem es lange in Abrede gestellt war. N. macht aufmerksam, dass es dabei nur auf die Stellung des Kopfes ankomme, gleichgiltig, durch welche Muskelwirkung, in welchen Gelenken sie erzeugt werde, oder ob sie passiv hergestellt sei.

Wir haben also Correctionen der Verschiebung des Gesichtsfeldes bei Drehung des Kopfes durch compensirende Bewegungen der Bulbi. Bedenken wir, dass bei den Flourens'schen Versuchen, beim electrischen und Drehschwindel immer mit dem Schwindel (l. c. nach unserer Auffassung der Affection der Bogengänge), intensiver Nystagmus in den entsprechenden Ebenen vorhanden ist,

so liegt es nahe zu glauben, dass in diesen Correctionen der Stellung des Gesichtsfeldes ein Theil der teleologischen Bedeutung unseres Apparates liege.

Die erste Note von Brown vom 19. Jänner 1874 ist mir nicht zugänglich, da aber auch seine spätere Publication sehr kurz ist, so lasse ich sie hier vollständig folgen.

From the Journal of Anatomy and Physiology. Vol. VIII.

On the sense of Rotation and the Anatomy and Physiology of the semicircular Canals of the internal Ear. By Prof. A. Crum Brown, M. D. University of Edinburgh.

For some time I have been convinced that we possess a sense of Rotation quite distinct from all our other senses. By means of this sense we are able to determine — 1st, the axis about which rotation of the head takes place; 2nd, the direction of the rotation; and 3rd, its rate.

In ordinary circumstances we do not wholly depend upon this sense for such information. Light, hearing, and the muscular sense assist us in determining the direction and amount of our motions of rotation, as well as of those of translation; but if we pourposely deprive ourselves of such aids we find that we can still determine with considerable accuracy the axis, the direction, and the rate of rotation. The experiments that I have made with the view of determining this point were conducted as follows: a stool was placed on the centre of a table capable of rotating smoothly about a vertical axis; upon this the experimenter sat, his eyes being closed and bandaged; an assistant then turned the table as smoothly as possible through an angle of the sense and extent of which the experimenter had not been informed. It was found that, with moderate speed, and when not more than one or two complete turns were made at once, the experimenter could form a tolerably accurate judgement of the angle through which he had been turned. By placing the head in various positions it was possible to make the vertical axis coincide with any straight line in the head. It was found that the accuracy of the sense was not the same for each position of the axis in the head, and further, that the minimum perceptible angular rate of rotation varied also with the position of the axis. It was also found that considerable differences of accuracy exist in different individuals.

The sense of rotation is, like other senses, subject to illusions, rotation being perceived where none takes place. Vertigo or giddiness is a phenomenon of this kind.

When, in the experiments just mentioned, rotation at a uniform angular rate is kept up for some time, the rate appears to the experimenter to be gradually diminishing, and to cease altogether after a time, varying with the position of the head, and different with different individuals; if the rotation be then stopped, he experiences the sensation of rotation about the same axis in the opposite direction. If the position of the head be changed after the prolonged rotation has been made, the position of the axis of the apparent rotation is changed, retaining always the same position relatively to the head as was occupied by the axis of the real rotation. The readiness with which this complementary apparent rotation is produced is not the same for each axis. In such experiments, as long as the eyes are shut, and the axis of rotation kept vertical, a sensation of giddiness is not experienced. That sensation appears to be caused

by the discordance between the testimony of the sense of rotation, and that of some other sense. Thus if I experience a sensation of rotation, it makes no difference to my mind whether that sensation corresponds to a real rotation or not, as long as I have no means of ascertaining independently the existence or non-existence of the real rotation. I am in that position as long as my head is fixed and my eyes shut. But if, while the complementary apparent rotation is felt, I open my eyes, I still feel that I am being turned round, but at the same time I see that external bodies retain their position relatively to me — if I am turning round so are they — and this produces at once a feeling of insecurity or giddiness. Similarly this giddy or insecure feeling is produced, if, while the complementary apparent rotation is felt, the head be moved so that the axis of this rotation is no longer vertical.

The sense of rotation, being a special sense, must necessarily have a special peripheral organ physically constituted so as to be affected by rotation, a sensory nerve, and a central organ. The structure of the semicircular canals of the internal ear is such as to fit them to act as such a peripheral organ, and the experiments of Flourens and of Goltz support this view. The bony canals are filled with liquid, in which float loose connective tissue and the membranous canals with the contained endolymph. Rotation of the head about an axis at right angles to the plane of a canal will then produce, on account of the inertia of the liquid, ect., motion of the contents relatively to the walls of the canal, and this may be expected to irritate the terminations of the nerves in the ampulla. If the rotation be continued at a uniform rate, fluid friction, friction of the endolymph against the membranous canal, and of the perilymph against the membranous canal and the periosteum, will gradually diminish this relative motion. which will at last cease. We should therefore expect, as we have seen to be the case, that continued uniform rotation should be perceived less and less strongly, and that the sensation should at last die away altogether. The time required for this equalisation of the motion of the canal and its contents will depend upon the rate of rotation and upon the dimensions of the canal and the amount of attachment of the membranous canal to the periosteum. These latter conditions are not the same in the three canals, and therefore we ought to find, as we do, that the rate at which the sense of rotation dies away is not the same for different positions of the head. Again, if the uniform rotation is stopped, the contents of the canal will continue to move on, thus causing an apparent rotation in a direction the reverse of that of the original rotation, and this also will die away owing to friction.

As the three canals are in planes nearly at right angles so one another, rotation about any axis can be resolved into rotations, each of which will produce the effect described above upon one of the canals, and thus any rotation will have its appropriate sensation.

So far then this view of the function of the semicircular canals seems to explain the phenomena of the sense of rotation, and I find that an explanation almost identical with this was given by Professor Mach, of Prague, and by Dr. Breuer, of Vienna, shortly before I communicated the substance of this paper, as a preliminary note, to the Royal Society of Edinburgh Proceedings, 19th January. 1874). But this explanation is not sufficient. As far as we know, a nerve current can vary only in intensity and not in kind, so that, if irritated at

all, whether by right-handed so by left-handed rotation, the nerve would convey the same message to the central organ. The solution of this difficulty which I proposed is as follows: — Each canal has an ampulla at one end only, and there is thus a physical difference between rotation with the ampulla first, and rotation with the ampulla last, and we can easily suppose the action to be such that only one of these rotations (say that with the ampulla first, in which case, of course, there is a flow from the ampulla into the canal) will affect the nerve terminations at all. [In the preliminary note above referred to, I described a way in which this might be supposed to take place.] One canal can therefore, on this supposition, be affected by, and transmit the sensation of rotation about one axis in one direction only, and for complete perception of rotation in any direction about any axis six semicircular canals are required, in three pairs, each pair having its two canals parallel (or in the same plane) and with their ampullae turned opposite ways. Each pair would thus be sensitive to any rotation about a line at right angles to its plane or planes, the one canal being influenced by rotation in the one direction, the other by rotation in the opposite direction.

Now we have six semicircular canals, three in the one ear and three in the other, and I find in all the animals that I have examined, that the exterior canal of one ear is very nearly in the same plane as that of the other; while the superior canal of one ear is nearly parallel to the posterior canal of the other.

The three axes are therefore — 1st, a vertical (*) axis at right angles to the plane of exterior canals; 2nd, an axis which may be roughly defined as passing (in the human subject) through the left eye and the right mastoid process at right angles to the planes of the right superior and the left posterior canal, and 3rd, an axis passing through the right eye and the left mastoid process at right angles to the right posterior and left superior canals.

In different animals there are great differences in relative size and position of the canals, but the relation just mentioned appears to exist in all cases. This relation may be most simply statet thus: In each ear there is one canal (the exterior) in a plane at right angles to the medial plane, and two other canals (the superior and the posterior) in planes equally inclined to the medial plane. In no other way is it possible to harmonize the bilateral symmetry of the two ears with the condition, that each of the three axes shall have two oppositely turned canals in planes at right angles to it.

2.

Nachdem wir gefunden, dass Haut, Muskel, Blut, Hirn sich als Quellen der Bewegungsempfindungen zwar nicht absolut ausschliessen lassen, aber zur Erklärung der Einzelheiten nicht ausreichen und dass man zur Annahme eines besondern Endorgans der Bewegungsempfindungen gedrängt wird, dessen Sensationen, weil sie nicht schon für andere Zwecke verbraucht sind, unzweideutige Merkmale der

(*) In the human subject this axis is not quite vertical when the head is held in its usual position; it becomes so when the face is inclined slightly downwards.

Locomotion liefern können, wollen wir nun die schon vorläufig angedeutete auf dies Organ bezügliche Hypothese näher entwickeln.

Denken wir uns eine mit Nervenenden ausgekleidete Höhle in einem Körper B, welche irgend einen flüssigen oder festen Inhalt A hat. Derselbe wird erstens vermöge der Schwere auf eine Stelle der Wand stärker drücken, als auf die übrigen und dadurch die Lage von B gegen die Verticale bezeichnen. Bei jeder Beschleunigung, die B annimmt, wird zweitens A eine Gegenbeschleunigung, (einen Gegendruck) ausüben, die sich mit der Schwerebeschleunigung zusammensetzt, wodurch sowohl die Druckintensität als auch die Druckstelle an der Höhlenwand sich ändert. Endlich wird drittens bei jeder Winkelbeschleunigung, die B annimmt, A eine Gegendrehung auszuführen suchen. Durch 1 und 2 kann B zur Kenntniss seiner Lage und progressiven Beschleunigung, durch 3 zur Kenntniss seiner Winkelbeschleunigung gelangen. Der Vorhof mit den Bogengängen dürfte ein solches Organ sein, dessen Schema wir hier entwickelt haben. Es ist auch wahrscheinlich, dass für 1 und 2 specifisch andere Nerven vorhanden sind wie für 3. Betrachten wir die Bogengänge, so scheinen uns diese besonders geeignet, das Flächenprincip zur Geltung zu bringen. Für jede Winkelbeschleunigung um die zur Bogenebene senkrechte Axe muss der Inhalt ein Drehungsmoment von entgegengesetztem Sinn ausüben, welches die Nerven der Ampullen als Zeichen dieser Winkelbeschleunigung weiter leiten.

J. Müller hat darauf hingewiesen, dass jedem Sinnesnerven seine specifische Energie zukömmt, so zwar, dass die verschiedensten Reize nur die ihm eigenthümliche Empfindungsqualität auslösen, während derselbe Reiz in verschiedenen Sinnesnerven eben die verschiedenen ihnen zukommenden Empfindungsqualitäten erregt. Nehmen wir nun nach den von Müller, Handbuch der Physiologie Bd. 2, S. 251—258 aufgestellten Grundsätzen I—VIII an, dass die Ampullennerven, die specifische Energie haben, auf jeden Reiz mit einer Drehempfindung zu antworten, so werden uns sofort viele Erscheinungen klar und mancherlei zerstreute Beobachtungen sammeln sich unter ein Princip. Die Flourens'schen Dreherscheinungen verstehn sich unter dieser Annahme von selbst um so mehr, wenn wir mit Löwenberg es für wahr-

scheinlich halten, dass die Durchschneidung der Bogengänge nicht als Lähmung, sondern als Reizung wirkt. Die Goltz'sche Ansicht bleibt im Wesentlichen bestehn, wenngleich sie gewisse Modificationen erfährt. Die gewöhnlichen Erscheinungen des Drehschwindels erklären sich nach demselben Princip. Der Drehschwindelversuch ist eben nichts weiter als der Flourens'sche Versuch. Statt die Durchschneidung der Bogengänge anzuwenden, reizen wir die Ampullennerven, indem wir dem Inhalt der Bogengänge durch Winkelbeschleunigung ein Drehungsmoment ertheilen, vermöge dessen er an den Ampullennerven zerrt. Wie man sieht, erklärt diese Theorie ausserordentlich leicht alle bei passiven Bewegungen des Körpers beobachteten subjectiven Erscheinungen in so einfacher und selbstverständlicher Weise, dass eine besondere Ausführung darüber unnöthig erscheint. Auch jene Phänomene, welche bei Bewegungen des Kopfes während der Rotation auftreten, bieten der Erklärung keine Schwierigkeit. Denken wir uns z. B. bei einer Rotation um eine verticale Axe einen Bogengang, dessen Ebene die Rotationsaxe enthält. Auf den Inhalt dieses Bogenganges wird keine Componente des Drehungsmomentes entfallen. Sobald aber die Bogengangebene gegen die Rotationsaxe geneigt wird, tritt in dem Bogengang sofort eine Componente des Drehungsmomentes auf und gibt Anlass zur Entstehung der betreffenden Drehempfindung. Man sieht auch, dass bei geringen Lagenänderungen die Axe der scheinbaren Drehung senkrecht steht auf der Rotationsaxe und der Axe der Kopfneigung. Die Erklärung ändert sich nicht wesentlich und folgt in gleicher Weise aus der Poinsot'schen*) Theorie der Zusammensetzung der Drehungen, wenn man auf alle Bogengänge Rücksicht nimmt.

3.

Führt man das Princip der specifischen Energieen consequent durch, so gelangt man zu der Annahme, dass verschiedenen Drehempfindungen auch verschiedene Nerven entsprechen müssen, so zwar, dass nicht nur eine Drehung um eine andere Axe, sondern auch eine Drehung von entgegengesetztem Sinn, von einem andern Nerv geliefert wird. Es ist nun nicht ganz leicht, die Erfüllung dieser For-

---

*) Poinsot, nouvelle théorie de la rotation des corps. Paris 1859.

derung am Labyrinth aufzuzeigen. Die Empfindung der Drehung um beliebig liegende Axen kann man sich zusammengesetzt denken aus den Empfindungen der Drehung um die Bogengangaxen, in derselben Weise wie sich die Bewegungen selbst zusammensetzen. Allein wie gewinnt man die Drehempfindungen von entgegengesetztem Sinn?

Zur Zeit meiner ersten Mittheilung konnte ich mich nicht entschliessen, das beiderseitige Labyrinth in der Weise als zusammengehörig zu betrachten, dass nur beide Organe zusammen eine vollständige Raumvorstellung geben. Ich nahm desshalb an, dass in jeder der drei Ampullen eines Labyrinthes zwei Nerven seien, von welchen der eine auf den einen, der andere auf den andern Drehungssinn reagirt. Die Annahme, welche sich mir mehrmals dargeboten hat, und die ich immer zurückgewiesen habe, ist nun von Brown gemacht worden. Nachdem sie mir nun objectiv gegenübersteht und ich dieselbe unbefangener beurtheilen kann, stehe ich nicht an sie für die weitaus bessere zu halten und mich ihr anzuschliessen. Ich muss dies umsomehr thun, als Details der Flourens'schen Versuche, die mir früher unbekannt waren und die auch Brown nicht anführt, sich dieser Annahme in ausgezeichneter Weise anschliessen.

Um die Zusammenwirkung der beiden Labyrinthe, wie Brown sich dieselbe denkt, deutlich zu übersehn, wollen wir die Stellung der Bogengangebenen in beiden Labyrinthen darstellen. Hiezu verwenden wir das Princip, welches schon in einer frühern Arbeit zu demselben Zweck gebraucht wurde*). Wir stellen die Tracen von Ebenen, welche den Bogengangebenen parallel sind und die wir durch zwei Punkte R und L (rechtes und linkes Ohr) legen, auf zwei im Kopf leicht auffindbare Coordinatenebenen dar. Die eine dieser Coordinatenebenen H (wir wollen sie die horizontale nennen) steht senkrecht zur Medianebene des Kopfes und geht durch den vordern und untern Rand des Oberkiefers und durch einen Punkt, der in der Medianebene im Os basilare etwa 7mm vor dem Occipitalrand in der spongiosen Substanz und etwa 15mm über der untern

*) E. Mach u. J. Kessel, Beiträge zur Topographie und Mechanik des Mittelohres. Sitzgsber. d. Wiener Akad. Bd. 69.

Aussenfläche dieses Knochens liegt. Die zweite Ebene *V* (die verticale) geht durch letzteren Punkt und steht zur vorigen Ebene und zur Medianebene senkrecht. Da es nur auf die Stellung und nicht auf die Lage der Bogengangebenen ankommt, so können wir irgend

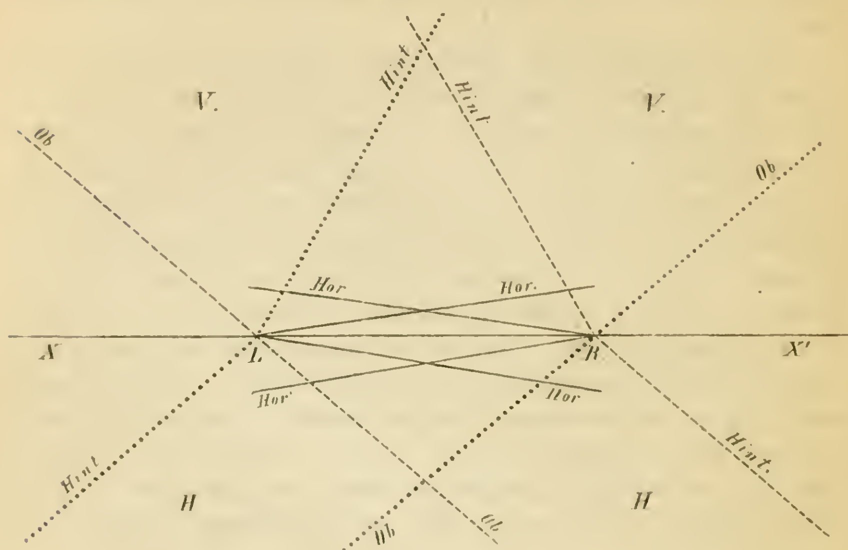


Fig. 17.

welche diesen Coordinatenebenen parallele wählen und auf denselben nach dem Princip der descriptiven Geometrie die Tracen der den Bogengangebenen parallelen Ebenen zeichnen. Die Punkte *R* und *L* (Fig. 17) legen wir der Uebersichtlichkeit wegen in den Durchschnitt *XX'* der Ebenen *H* und *V*. In der Figur bedeutet aber das Blatt oberhalb *XX'* die Ebene *V*, unterhalb *XX'* die Ebene *H*. Knickt man das Blatt rechtwinklig um *XX'*, so geben die Tracen unmittelbar ein Bild von der Stellung der Bogengangebenen. In der Figur bedeutet nun *Hor* den horizontalen, *Ob* den oberen und *Hint* den hinteren Bogengang. Man hat sich beim Anblicke der Zeichnung vorzustellen, dass man hinter dem Kopfe steht, dessen Gehörorgane dargestellt sind. Wie man sieht, sind die horizontalen Bogengänge nicht sehr geneigt gegeneinander. Ausserdem sind der hintere Bogengang der einen und der obere Bogengang der andern Seite einander ziemlich parallel. Die als parallel angesehenen Bogengänge beider

Seiten sind durch gleiche Ausführung der Tracen kenntlich. Auf diesen Parallelismus beider Seiten legt nun Brown, wie ich glaube mit Recht, grossen Werth. Bezeichnen wir den Drehungssinn aus der Ampulle in den Bogengang (ohne Passirung des Vorhofs) durch einen Pfeil, und nehmen wir mit Brown an, dass nur bei dem einen Drehungssinn der Bogengang mit Empfindung reagirt, so erkennen wir leicht, dass der obere rechte und der hintere linke Bogengang geeignet scheinen, entgegengesetzte Drehungen um eine zu ihrer Ebene senkrechte Axe zu signalisiren. Ebenso gehören der obere linke und der hintere rechte Bogengang zusammen und geben entgegengesetzte Drehungen um eine andere zu ihrer Ebene senkrechte Axe an. In der Figur 18 bedeuten die Flächen *H* und *V* des Klotzes die beiden Coordinatenebenen. An die Ecken des Klotzes legen wir die Punkte *R* und *L* und stellen an denselben durch Papier die Bogengangebenen vor. Bei *R* sehen wir in eine hohle, bei *L* auf eine convexe Ecke. Die Bogengänge sind mit denselben Zeichen, wie in der vorigen Figur bezeichnet, und die Pfeile auf den Ebenen geben den Drehungssinn von der Ampulle in den Bogengang an.

Es gehören also die beiden horizontalen Bogengänge zusammen zu einer Axe, welche durch den Kopf geht, der Medianebene parallel steht und nach hinten und oben gerichtet ist.

Der rechte obere und der linke hintere Bogengang geben den

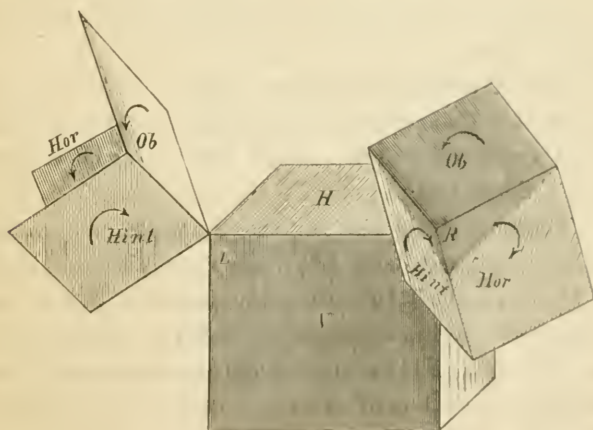


Fig. 18.

entgegengesetzten Drehungssinn um eine Axe an, welche durch den Kopf geht nach vorn oben links; nach Brown durch das linke Auge und den rechten proc. mastoid.

Der rechte hintere und der linke obere Bogengang sind wieder zusammengehörig. Ihre Axe geht durch den Kopf nach oben rechts vorn. Brown sagt, sie geht durch das rechte Auge und den linken proc. mastoïd.

Da diese drei Axen zu einander nahe rechtwinklig stehn, so sind sie sehr zweckmässig disponirt, um für jede Drehung um eine beliebige Axe immer ausgiebige Componenten zu erhalten.

Wir wollen uns nun noch jene Details der Flourens'schen Versuche in Erinnerung bringen, welche dieser Auffassung sehr günstig sind.

Flourens gibt an, dass bei Durchschneidung der beiden »verticalen untern« Canäle die Thiere auf den Rücken stürzen, während sie bei Operation der beiden »verticalen obern« Canäle nach vorn überfallen. In der That muss, wenn Brown Recht hat, bei der Stellung der Canäle gegeneinander dies das Resultat sein.

Nach Durchschneidung des linken Bogenganges am Kaninchen findet Flourens eine Verdrehung des Kopfes nach links. Halten wir dies Resultat mit den Versuchen an gedrehten Thieren zusammen, so geht daraus hervor, dass das Thier bei Reizung der Ampulle des horizontalen linken Bogenganges wahrscheinlich die Empfindung einer Rechtsdrehung um eine verticale Axe hat.

Bei Durchschneidung der beiden hintern Verticalcanäle am Kaninchen zeigt sich Ueberschlagen nach hinten. Das Thier meint also bei Affection der Ampullen der hintern Bogengänge nach vorne überzustürzen.

Die Durchschneidung der vordern Verticalcanäle an Kaninchen ist ohne Hirnverletzung nach Flourens' Angabe sehr schwer ausführbar. Doch glaubt Flourens in einzelnen Fällen ein Ueberstürzen nach vorn wahrgenommen zu haben. Demnach würde Reizung der Ampullen der beiden vordern verticalen Bogengänge die Empfindung des Umstürzens nach hinten bedingen.

Leicht können wir nun noch weitere Schlüsse ziehn. Bei Rei-

zung der Ampulle des linken horizontalen Bogenganges empfinden wir Rechtsdrehung um eine verticale Axe, also von oben gesehn Drehung im Sinne des Uhrzeigers. Umgekehrt wird also, wenn wir eine Rechtsdrehung ausführen, die Ampulle des linken horizontalen Bogenganges gereizt werden müssen. Dann geht aber der Trägheitsantrieb des Bogenganginhaltes dem Sinne nach von der Ampulle (ohne Passirung des Vorhofs) in den Bogengang. Wir werden also durch die Details der Flourens'schen Versuche dazu geführt, anzunehmen, dass nur der Bewegungsantrieb der Ampulle gegen den Bogengang als umgekehrte Drehung empfunden wird, nicht aber der Bewegungsantrieb der Ampulle vom Bogengang weg. Dies hat Brown, wenn auch, wie es scheint, auf andere Gründe gestützt, vermuthet.

Mit Hilfe dieses Resultates können wir aber die beiden andern von Flourens beobachteten Phänomene erklären und dies wird man für eine nicht geringe Stütze der Theorie halten. Ueberstürzen nach hinten reizt nämlich nach dem angegebenen Grundsatz die beiden Ampullen der obern (vordern) verticalen Bogengänge. Umgekehrt wird also Reizung der Ampullen der obern Bogengänge die Empfindung des Umstürzens nach hinten zur Folge haben müssen. Dies lehrt der Flourens'sche Versuch in der That, denn die Thiere stürzen im Bedürfniss die empfundene Bewegung zu compensiren nach vorn.

Gleich gut lässt sich der dritte Fall erklären. Umstürzen nach vorn gibt eine Drehcomponente an beiden hintern Bogengängen, deren Ampullen dadurch gegen die Bogengänge angetrieben werden. Beide Ampullen der hintern Bogengänge zusammen signalisiren also das Vorwärtsstürzen und dies beobachtet auch Flourens, denn die compensationsbedürftigen Thiere fallen nach hinten. Soweit also die Thatsachen bisher bekannt sind, fügen sie sich bis in die Details einer vollständig consequenten Erklärung aus unserer Hypothese.

Flourens hat Drehung der operirten Thiere um die Verticalaxe und um die Queraxe des Kopfes beobachtet. Man sieht, wie man die Thiere operiren müsste, um die dritte bisher vermisste Drehung um die Längsaxe des Kopfes und Rumpfes wahrzunehmen. Man müsste beim Kaninchen den hintern und obern Bogengang der linken Seite anschneiden, damit sich das Thier von hinten gesehn im Sinne

des Uhrzeigers um die Längsaxe des Körpers dreht. Dieselbe Operation auf der rechten Seite würde für denselben Standpunkt die Drehung dem Uhrzeiger entgegen hervorbringen.

Die Operationen am linken vordern und rechten hintern, sowie jene am rechten vordern und linken hintern Bogengang müssten sich compensiren. Es ist lebhaft zu bedauern, dass die Erfolg versprechenden Versuche von Breuer mit der electrischen Reizung der Bogengänge bisher noch nicht zum Abschluss gekommen sind. Es müsste endlich doch möglich sein, eine einzelne Ampulle durch die beiden auf dieselbe gesetzten Electroden, wobei die Stromschleifen ins Hirn doch verschwinden, isolirt zu reizen. Die hier vorgebrachte Theorie würde damit einer Prüfung unterzogen werden können, welche von den gegen die Sectionen erhobenen Einwürfen vollständig frei wäre.

4.

Wir haben im Vorhergehenden wiederholt die Bemerkung gemacht, dass Progressivbeschleunigungen ebenso wie Winkelbeschleunigungen empfunden werden. Dem entsprechend werden wir erwarten, ähnliche Organe, wie die Bogengänge es für die Drehung sind, auch für die Progressivbewegung im Ohrlabyrinth vorzufinden. Es muss dies ein Organ sein, welches der Einwirkung der Beschleunigung von jeder Seite her ziemlich gleich zugänglich ist. Ich habe mir die Vorstellung gebildet und dieselbe bei Gelegenheit einer frühern Mittheilung als Vermuthung ausgesprochen, dass der Sacculus des Vorhofs dieses Organ für die Empfindung der Progressivbeschleunigung sei.

Breuer von ähnlichen Erwägungen geleitet, spricht sich folgendermaassen aus:

. . . . »Wohl aber werden feste Körper, welche ein von dem der Flüssigkeit verschiedenes specifisches Gewicht haben und irgendwie in derselben suspendirt sind, bei jeder auch geradlinigen Bewegung ihrem Beharrungsvermögen zufolge zurückbleiben, d. h. relativ zur Flüssigkeit die entgegengesetzte, beim Stillstehn des Ganzen dieselbe Bewegung machen. Wie gross diese Bewegungen ausfallen, wird von dem Unterschiede des specifischen Gewichtes, vom Widerstande der Flüssigkeit und von der Art der Suspension abhängen. Finden wir im Labyrinth dergleichen? — Ja, wenn wir der Be-

schreibung der Macula acustica von Hasse folgen (Zeitschr. f. wissensch. Zoologie. 1867. p. 637)«. . . .

Breuer meint, dass die Trägheit der Otolithenmasse sowohl die Wahrnehmung der Beschleunigungen als jene der ruhigen Kopfstellungen vermittle. Er führt für die Existenz der letztern Function die von Skrebitzky und Nagel beobachteten Drehungen der Bulbi an, welche bei bestimmter Kopfneigung persistiren.

Ich habe schon in meiner ersten Mittheilung betont, dass man für die Empfindung der Progressivbeschleunigung andere Organe annehmen müsse, wie für jene der Winkelbeschleunigung. Auch wurde dort bemerkt, dass bei strengem Festhalten an den specifischen Energieen sogar noch eine dritte Art Organe, nämlich für die Empfindung der Lage, nothwendig sei. Denn wenn die Bewegung gleichförmig geworden, verschwindet die Empfindung. Die Empfindung der Lage — und auch ihre Folge, die Augenstellung — bleibt aber so lange wie die Lage selbst.

Immerhin bleibt hier eine Schwierigkeit aufzulösen. Es würde für die Empfindung der Lage und der Progressivbeschleunigung eine Art von Nerven ausreichen, wenn man annehmen könnte, dass einfach der Druck auf die Innenfläche einer Höhle empfunden wird. Je nach der Stelle des grössten Druckes ändert sich die Empfindung der Lage, je nach der Grösse des Druckes die Empfindung der Beschleunigung. Nun wissen wir aber, dass eine bleibende Progressivbeschleunigung nach einiger Zeit nicht mehr empfunden wird. Die Organe der Beschleunigung erschöpfen sich also. Für die Organe der Lage dürfen wir aber eine solche Erschöpfung nicht annehmen. Es ist schwer, sich ein solches nicht ermüdendes Organ vorzustellen. Der Hörnerv scheint freilich in mancher Hinsicht sich ähnlich zu verhalten. Immer sehn wir aber, dass für die Organe der Beschleunigungsempfindung und der Lagenempfindung so verschiedene Eigenschaften gefordert werden, dass wir sie zugleich in einem Organ nicht annehmen können.

Würde man auf einen Planeten von kleinerer Masse versetzt, so müsste man zunächst das Gefühl des fortwährenden Versinkens haben. Nach den in dieser Schrift mitgetheilten Versuchen kann es aber nicht zweifelhaft sein, dass dies Gefühl allmälig verschwinden und dem der Ruhe Platz machen würde. Denn auch eine

bleibende Beschleunigung wird zuletzt nicht mehr empfunden. Man kann sich ja auch nicht vorstellen, dass gerade das bei uns übliche g allein nicht als Bewegung, sondern als Ruhe, jede grössere Schwerebeschleunigung aber als Steigen, jede kleinere als Versinken empfunden werden muss. Man wird sich eben zu denken haben, dass jede Veränderung des g die Organe afficirt, welche, indem sie dieser Affection zu entgehen suchen, nach einem neuen Gleichgewichtszustand streben, in welchem sie nicht mehr afficirt werden. Dieser Gleichgewichtszustand wird bei geringeren Aenderungen in der Beschleunigung früher, bei grösseren später erreicht. Das Organ adaptirt sich. Daneben sollen wir uns nun ein anderes Organ denken, welches sich so rasch ernährt, dass es immer in Thätigkeit bleibt!

5.

Die einfachen Bewegungsempfindungen, die wir gefunden haben, sind also:

1. die Empfindungen der Winkelbeschleunigung, und zwar sechs an der Zahl, den sechs Ampullen entsprechend, wovon je zwei einander entgegengesetzt sind;
2. die Empfindungen der Progressivbeschleunigung, welche mindestens auch sechs an der Zahl sein müssen, ebenfalls paarweise entgegengesetzt, wenn die Erscheinungen erklärbar sein sollen.

An diese schliessen sich aller Wahrscheinlichkeit nach noch

3. Empfindungen der Lage oder Gleichgewichtsempfindungen, über deren Zahl und Art wir vorläufig nichts Näheres feststellen können, wesshalb auch hier nicht weiter davon die Rede sein soll.

Diese einfachen Empfindungselemente fühlen wir bei unsern Bewegungen nicht heraus. Wir fühlen eine Drehung um diese oder jene Axe, in diesem oder jenem Sinn, mit verschiedener Beschleunigung, eine Progressivbewegung von verschiedener Richtung, verschiedenem Sinn und verschiedener Beschleunigung, aber die einfachen Componenten mit ihrer Richtung und ihrem Sinn kommen uns nicht zum Bewusstsein. Es ist hier ähnlich wie im Gebiete

der Farben. Es gibt unendlich viele Wellenlängen des Lichtes und zugehörige Farbennüancen, nach der Young'schen Theorie aber nur drei Grundfarbenempfindungen. Auf die Modificationen, welche nach meiner Meinung an der Young'schen Theorie angebracht werden müssen, habe ich anderwärts hingewiesen*). Ebenso gibt es nun unendlich viele Axen im Raume, um welche die Drehung stattfinden kann. Subjectiv aber gibt es bloss drei Grundaxen — die oben bezeichneten — mit ihren zugehörigen sechs Grunddrehempfindungen. Während aber die Young'schen Grundfarben bisher nur vermuthet und nicht aufgezeigt worden sind, weist hier die Anatomie die Organe der Grundempfindung auf und man wird ohne Zweifel dazu gelangen, jedes einzelne Organ für sich zu reizen.

Auf den Naturmenschen stürmen die Erscheinungen von allen Seiten ein; er hat nicht Zeit noch Gelegenheit, zu sondern was auf der einen, was auf der andern Nervenbahn ihm zufliesst. So sind die ersten Begriffe, die er sich erwirbt, Dinge, gewisse mit relativer Constanz auftretende Complexe von Erscheinungen, die sich aus den verschiedensten Sinnesempfindungen zusammensetzen. Die ersten Worte sind Namen für diese Dinge.

Erst eine reichere Erfahrung lehrt, dass Theile dieser Complexe, etwa die durch das Auge zufliessenden Empfindungen in verschiedenen andern Complexen auch vorkommen und sich von jenen, in welchen sie früher allein beobachtet wurden, loslösen lassen. So abstrahirt man von den Dingen das Sichtbare, durch einen gleichen Process von dem Sichtbaren die Gestalt, die Farbe u. s. w. So hat der geachtete Sprachforscher Geiger nachzuweisen gesucht, dass alle jetzigen Farbennamen ursprünglich Namen für Dinge waren, indem der Urmensch eben nicht Farben gesehen hat, sondern Dinge.

Die weitere Analyse der Empfindungen fällt aber in der Regel erst der Wissenschaft zu. Sie löst die Farben in Grundfarben, den Schall in Tonempfindungen auf. Bei anderer Gelegenheit habe ich zu zeigen versucht, dass mit dem bis jetzt Geleisteten die Analyse kaum abgeschlossen ist**). Muthmaasslich entspricht Allem, was wir aus unsern Empfindungen abstrahiren können, wie der Gestalt, dem

*) Ueber intermittirende Lichtreize. Archiv von Reichert u. Dubois. 1865.

**) Mach, Bemerkungen zur Lehre vom räumlichen Sehen. Fichte's Zeitschrift für Philosophie. 1864.

Rhythmus, der Dauer, der Distanz, der Intensität, der Tonhöhe eine Empfindungsqualität eigener Art. Abstrahiren heisst in Disparatem gemeinsame Bestandtheile herausfühlen. Dieses Herausgefühlte muss nun auch in allem Verglichenen existiren und muss einen reellen Boden haben in der Empfindung.

Wenn wir diese letzten Empfindungselemente kennen werden, vielleicht auch im Stande sein werden, sie isolirt wach zu rufen, wird es keine Schwierigkeit haben, sie aus jeder Wahrnehmung herauszufühlen, so wie wir jetzt schon die Farbe aus dem Gesehenen, den Ton aus dem Klang und Geräusch ohne Mühe herausfühlen. Dann wird die Zeit der exacten Psychologie nicht fern sein. Wir werden die gleichartigen Theilvorgänge kennen, aus welchen sich alles Psychologische zusammensetzt und welche sich dann wie physikalische elementare Vorgänge gegeneinander abzählen lassen.

6.

Wir haben an den Bewegungsempfindungen schon eine Eigenthümlichkeit bemerkt, auf die wir hier nochmals zurückkommen müssen. Zwei und zwei stehen zu einander im Verhältniss des Positiven und Negativen. Ihre Organe müssen also in einer derartigen Wechselwirkung sein, dass die Function des einen jene des andern aufhebt. Halten wir unsere Hypothese fest, so kann die Function der Ampulle des linken horizontalen Bogenganges die Thätigkeit der Ampulle des rechten horizontalen Bogenganges aufheben. In der gleichen Beziehung stehn die Ampullen des linken obern und rechten hintern, so wie jene des rechten obern und linken hintern Bogenganges.

Dies geht aus dem Versuch hervor. Hat man eine längere Rotation unterbrochen, so tritt die Empfindung der Gegenrotation ein und währt noch fort, wenn längst alle Beschleunigungen verschwunden sein müssen. Diese Empfindung dauert also viel länger als der Reiz. Die nachdauernde Empfindung kann aber sofort durch die Wiedereinleitung der ursprünglichen Rotation zum Verschwinden gebracht werden. Bei passender Wahl der Geschwindigkeit meint man dann, sich gar nicht zu drehn. Da nun beim Unterbrechen der Rotation die eine Ampulle gereizt wird und fortwirkt, während bei der Wiedereinleitung der Rotation die zweite Ampulle in Func-

tion tritt und sich nun gar kein Empfindungseffect einstellt, so müssen die beiden Ampullen in der angegebenen Beziehung stehn. Selbstverständlich bleibt dies bestehn, wenn auch unsere Hypothese fällt, und gilt dann von jenen Organen, welche der Bewegungsempfindung wirklich zu Grunde liegen.

Aus der grossen Nachdauer der Bewegungsempfindung und dieser Beziehung der Ampullen erklärt es sich auch, warum man bei einfachen kurzen Kopfwendungen keinen Schwindel bekommt. Die Empfindung, welche beim Bewegungsbeginn erregt wird und während der ganzen Bewegung nachdauert, wird ausgelöscht durch die Empfindung beim Ende der Bewegung.

Wenn wir uns längere Zeit gleichförmig drehen, erlischt die Wirkung des beim Beginn erregten Drehungsmomentes. Wir drehen uns ohne weitere Drehempfindung. Unterbrechen wir nun die Drehung, so entsteht ein entgegengesetztes Drehungsmoment, welches mit seiner nachdauernden Empfindung zur vollen Wirksamkeit gelangt. So entsteht der Drehschwindel.

7.

Ich muss nun eine Differenz zwischen meiner Auffassung der Functionsweise der Bogengänge und jener von Breuer und Brown besprechen. Da der Bogenganginhalt flüssig ist, so verfällt man zunächst und natürlich auf den Gedanken, auf den auch ich ursprünglich kam, dass der Inhalt des Bogenganges bei jeder Körperdrehung eine relative Gegenströmung ausführe. Dieser Gedanke lag mir besonders nahe, da ich bei früheren ganz heterogenen Versuchen oft gesehn hatte, dass die Flüssigkeit in einem aufgebrochenen und wieder mit Glas verschlossenen Bogengange bei Drehung und Wendung des Felsenbeins leicht herumfliesst. An einem Felsenbein kann man aber nie ganz sicher sein, ob das Labyrinth nicht irgendwo verletzt ist. Machte ich nun den Versuch mit einem geschlossenen Glasröhrchen von der Grösse und Form eines Bogenganges, oder mit einer entsprechenden Rinne in einer Messingplatte, die mit Glas gedeckt war, so erhielt ich auf der Centrifugalmaschine selbst bei raschen Drehungen niemals eine beobachtbare relative Drehung. Ein flacher Wassertropfen von etwa 1^{cm} Durchmesser auf der Scheibe der Centrifugalmaschine, zeigt hingegen bei bestäubter Oberfläche das

Flächenprincip sofort. Ich habe daher die ursprüngliche Annahme einer wirklichen Strömung aufgegeben und angenommen, dass das blosse Drehungsmoment (der Druck) des Bogenganginhaltes ohne merkliche Drehung auf den Nerven wirke, so wie etwa Druck die Tastnerven der Haut erregt. Breuer und Brown hingegen nehmen eine ausgiebige Strömung der Endolymphe an.

Man wird leicht bemerken, dass die Nachdauer der Scheinbewegung nach Unterbrechung einer Rotation nicht aus einer fortdauernden Strömung zu erklären ist. Wie unerhört klein müsste der in Frage kommende Reibungscoefficient sein, der dies allein ermöglichen würde. Man muss also jedenfalls annehmen, dass die Empfindung viel länger dauert als die Erregung. Dann wird aber die anhaltende Strömung als Erklärungsgrund entbehrlich. Noch mehr! Die Flüssigkeit kann nur in so fern als Reiz wirken, als sie an der durch das Flächenprincip geforderten Bewegung gehindert ist.

Wir wollen nun sehen, wie sich das Verhältniss von Bewegung und deren Empfindung nach den verschiedenen Auffassungen gestaltet. Nehmen wir zunächst an, es finde keine ausgiebige Bewegung der Endolymphe statt. Kommen wir plötzlich in eine gleichförmige Bewegung, so wirkt die Beschleunigung nur am Anfang. Dennoch fühlen wir die Fortdauer der Bewegung. Man kann sagen die Beschleunigung erregt die fortdauernde Empfindung einer Geschwindigkeit. Dies gilt sowohl für die Progressiv- als auch für die Winkelbeschleunigung. Teleologisch ist dies leicht zu begreifen, denn es handelt sich hauptsächlich darum eine Vorstellung von der Geschwindigkeit zu erlangen, in welche wir bei der Bewegung gerathen sind. Namentlich ist dies wichtig, wenn die Thiere ihr Raumorgan etwa zur Abmessung eines Sprunges sollen verwenden können, bei welchem es auf die erlangte Bewegungsgrösse, also bei gleichbleibender Masse, auf die erlangte Geschwindigkeit ankommt.

Die erregte Bewegungsempfindung wirkt in abnehmender Intensität nach. Betrachten wir zuerst eine Bewegung von so kurzer Dauer, dass wir während derselben auf die Abnahme der erregten Empfindung keine Rücksicht zu nehmen brauchen. Die Dauer der Bewegung soll also gegen die Dauer der Nachempfindung verschwinden. Für diesen Fall können wir uns ein mathematisches Bild des Zusammenhanges von Bewegung und Empfindung ent-

werfen, dessen allseitiges Zutreffen freilich für jetzt noch nicht nachgewiesen werden kann. Die aufeinanderfolgenden Reizwirkungen und die entsprechenden Empfindungen betrachten wir als algebraisch summirbar. Ist v die variable Winkelgeschwindigkeit einer Kopfwendung oder die Geschwindigkeit einer progressiven Bewegung, t die Zeit, so setzen wir die durch ein Element der Bewegung erregte Geschwindigkeitsempfindung $d\varrho = a \frac{dv}{dt} dt$.

Nehmen wir die Dauer der Bewegung verschwindend gegen die Dauer der Nachwirkung, so haben wir am Ende der Bewegung die Empfindung

$$\varrho = a \int_{t_0}^{t_1} \frac{dv}{dt} dt$$

welche selbst $= 0$ ist, wenn für t_1 und t_0 auch v denselben Werth hat, wenn die Bewegung mit derselben Geschwindigkeit anfängt und endigt; denn wir haben unter dem Integralzeichen immer ein vollständiges Differential.

In jedem andern Fall hängt der Werth des ϱ nur von dem Anfangs- und Endwerthe von v ab. Da $\frac{dv}{dt}$ proportional dem Druck p, welchen das Organ im Labyrinth erfährt, so können wir auch schreiben

$$\varrho = k \int_{t_0}^{t_1} p dt,$$

wobei k eine neue Constante.

Man sieht also, dass die Bewegungsempfindung in derselben Weise von der variablen Beschleunigung abhängt, wie die Endgeschwindigkeit einer Masse von dem variablen Druck oder die Ausschlagsgeschwindigkeit einer Magnetnadel von der variablen Intensität des Inductionsstromes, was eben teleologisch wichtig zu sein scheint.

Nehmen wir also die Bewegung der Endolymphe als verschwindend an und setzen die Empfindungselemente in der besprochenen Weise als algebraisch summirbar voraus, so entspricht jedem Geschwindigkeitszuwachs ein Empfindungszuwachs von gleichem Zeichen, der-

art, dass für eine kurze Bewegung die endliche Bewegungsempfindung (Geschwindigkeitsempfindung) der totalen Aenderung der Geschwindigkeit parallel geht.

Nehmen wir nun eine ausgiebige Strömung der Endolymphe an. Nennt man die Winkelgeschwindigkeit des knöchernen Labyrinthes $v = \varphi(t)$, jene des Inhaltes u und setzt man die Reibung proportional der Relativgeschwindigkeit, so ist

$$\frac{du}{dt} = k[\varphi(t) - u]$$

wobei k eine Constante. Hieraus folgt

$$u = e^{-kt}[k' + \int e^{kt}\varphi(t)dt]$$

in welchem Ausdruck k' die Integrationsconstante vorstellt.

Betrachtet man die momentane Drehempfindung als proportional der Relativgeschwindigkeit, so ist dieselbe proportional dem Ausdrucke

$$\varphi(t) - e^{-kt}[k' + \int e^{kt}\varphi(t)dt]$$

Die einfache Beziehung zwischen der erlangten Endgeschwindigkeit und der Bewegungsempfindung geht hiemit verloren.

Wir wollen nun noch annehmen, dass die Endolymphe nicht merklich strömt, dafür aber Rücksicht nehmen auf die allmälige Abnahme der einmal erregten Empfindung. Wenn die Intensität der Empfindung im Momente der Erregung 1 ist, soll die nach Verlauf der Zeit τ durch $\psi(\tau)$ vorgestellt werden. Die Geschwindigkeit der Bewegung, welche mit $t = 0$ beginnen soll, sei $\varphi(t)$, dann ist die Bewegungsempfindung zur Zeit t ausgedrückt durch

$$\int_{\tau=0}^{\tau=t} \varphi'(t-\tau)\psi(\tau)d\tau$$

Man sieht, dass die beiden letzten Annahmen, jede für sich, schon sehr complicirte Resultate geben. Noch weniger erfreulich wäre es, wenn beide vereinigt werden müssten. Es könnte endlich auch gefordert werden, auf die Erschöpfung des Organs bei constantem Reize Rücksicht zu nehmen. Doch wird man wohl bemerken, dass wahrscheinlich die erste und einfachste Betrachtungsweise für alle Zwecke ausreicht.

Was die Bewegungen der Endolymphe betrifft, so ist noch zu bemerken, dass man dieselben nicht verwenden kann, um die Em-

pfindung der Progressivbewegungen nach demselben Princip zu erklären, wie jene der Drehbewegungen. Es ist im Labyrinth kein Raum, um progressive Nachbewegungen von der Dauer der Nachempfindung zu gestatten. Bei den Canälen hat man allerdings den Vortheil, dass die Annahme einer in sich zurücklaufenden Bewegung an sich nicht dieselben Schwierigkeiten bietet. Es sollen übrigens, wie ich gehört habe, bei manchen Thierarten Labyrinthe mit gallertartigem Inhalt vorkommen, bei welchen dann diese Auffassung ganz unmöglich ist. Möglich, dass bei manchen Thieren sich mehr die Breuer-Brown'sche, bei andern meine Auffassung der Wahrheit nähert.

8.

Es ist von Hitzig*) in Zweifel gezogen worden, dass die Massenbeschleunigungen des Labyrinthinhaltes ausreichen, um als wahrnehmbare Reize zu wirken. Diese Frage habe ich mir selbst vorgelegt und auch zu beantworten versucht, wofür natürlich nur wenige Anhaltspunkte zu finden sind. Zunächst muss auf die grosse Empfindlichkeit der Nervenendapparate überhaupt hingewiesen werden. Es ist schon daran erinnert worden, dass die Reizbarkeit zu der ausgelösten Empfindungsarbeit beiläufig in dem Verhältniss steht, wie die Arbeit eines Funkens zur Arbeit einer entzündeten Pulverladung. Wir wollen aber weiter ins Detail eingehn.

In welcher Weise der Druck auf einen empfindlichen Nervenendapparat Nervenarbeit auslöst, ist wohl nicht bekannt. Von dem Drucke des Labyrinthinhaltes bei gegebener Beschleunigung können wir also nicht ausgehn. Wohl aber ist für einige Fälle das Minimum der Reizarbeit bekannt, welches in der Secunde einem Sinnesorgan zufliessen muss, damit noch Empfindung erregt werde.

Töpler und Boltzmann**) haben auf optischem Wege die Excursionen der Luft einer Pfeife bestimmt und daraus ableiten können, dass an der Grenze der Hörbarkeit an das Ohr in der Secunde etwa $\frac{1}{3 \text{ Billionen}}$ Kilogrammeter Arbeit abgegeben werden. Ich selbst habe mit Hilfe von Flammen die Luftexcursionen gemes-

*) Untersuchungen über das Gehirn. S. 255.
**) Pogg. Ann. 1870. Bd. 141. S. 351.

sen und daraus für die Grenze der Hörbarkeit eine noch etwas kleinere Arbeit gefunden *).

Nach den Versuchen von Thomsen **) zur Bestimmung des mechanischen Lichtaequivalentes sendet eine Kerze, welche in der Stunde 8.2 Gramme Walrath verzehrt, in der Secunde $^1/_{35}$ Kilogrammeter Arbeit als Strahlen aus. Davon kommen auf 1 □^{mm} in 115 Metern Entfernung $\frac{1}{5740000 \text{ Millionen}}$ Kilogrammeter. Gleichwohl reicht diese Arbeit hin, um die Kerze zu sehn.

Eine ähnliche Berechnung können wir nun für das Ohrlabyrinth versuchen. Wenn einer Masse m, welche die Geschwindigkeit v_0 hat, die Geschwindigkeit v_1 ertheilt wird, so ist die betreffende Aenderung der lebendigen Kraft, also die aufgewandte Arbeit gegeben durch $\frac{m}{2}(v_1^2 - v_0^2)$. Erfährt nun das knöcherne Labyrinth eine Geschwindigkeitsänderung, so muss schliesslich, ob allmälig, ob schnell ist einerlei, der Inhalt desselben die gleiche Geschwindigkeitsänderung erfahren. Diese Aenderung der Geschwindigkeit des Inhaltes wird wohl zum Theil durch feste und nicht empfindliche Theile herbeigeführt, welche diese Arbeit aufbringen müssen. Ein Theil dieser Arbeit wird aber von den Nervenendapparaten selbst geliefert und wird umgekehrt Anlass zur Empfindung.

Soll einem in Kilogrammen ausgedrückten Gewicht p eine in Metern angegebene Geschwindigkeitsänderung v beigebracht werden, so ist, wenn die Beschleunigung der Schwere ebenfalls in Metern ausgedrückt wird, die hiezu erforderliche Arbeit $\frac{pv^2}{2g}$.

Nehmen wir nun an, es würde 0.1 Gramm Flüssigkeit des Labyrinthinhaltes durch den Widerstand der Endapparate in einer Secunde eine Geschwindigkeitsänderung von 1^{cm} ertheilt, so ist die den Nerven zufliessende Reizarbeit hiebei $\frac{1}{1960 \text{ Millionen}}$ Kilogrammeter. Obgleich also die Zahlen absichtlich niedrig gegriffen sind, so fällt doch die berechnete Arbeit sehr viel höher aus, wie in den beiden andern Fällen. Muthet man den hypothetischen Organen der Bewegungsempfindung im Labyrinth

*) Optisch-akustische Versuche. Die spectrale und stroboscopische Untersuchung tonender Körper. Prag 1872.

**) Pogg. Ann. Bd. 125. S. 389.

keine geringere Empfindlichkeit zu wie den übrigen Sinnesorganen, so sind die vorhandenen Reizgrössen zu ihrer Erregung reichlich genügend.

Wie erwähnt, ist es für die Gesammtarbeit, welche den Nerven zufliesst, gleichgültig, ob bei einer gegebenen Geschwindigkeitsänderung der Labyrinthinhalt diese rasch oder langsam annimmt, ob dessen Gegenströmung unmerklich oder merklich ist. Es kommt eben nur auf die totale Aenderung der lebendigen Kraft an. Dies zeigt sich auch, wenn wir das Schema des Vorgangs im Detail verfolgen. Nennen wir die Relativgeschwindigkeit des Inhalts gegen die Wand v, m die Masse des Inhalts und k den Coefficienten der Reibung, welche wir der Relativgeschwindigkeit proportional setzen, ferner V die anfängliche Relativgeschwindigkeit, s den Weg, welchen der Labyrinthinhalt relativ gegen die Wand beschreibt, t die Zeit, so ergeben sich leicht der Reihe nach die Gleichungen:

$$m\frac{dv}{dt} = -kv$$

$$v = Ve^{-\frac{k}{m}t}$$

$$s = \frac{mV}{k}\left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right)$$

$$v = V - \frac{ks}{m}$$

Streng genommen kommt, wie man sieht, bei unsern Annahmen der Labyrinthinhalt nie zur Ruhe. Der ganze Weg aber, nach welchem die Ruhe eintreten würde, ist endlich und gegeben durch

$$S = \frac{mV}{k}$$

Die gesammte Arbeit, welche aufgewandt werden muss, um den Inhalt in relative Ruhe zu bringen, ist demnach

$$k\int_0^S v\,ds = k\int_0^S \left(V - \frac{ks}{m}\right) ds = \frac{mV^2}{2}$$

wie wir dies auch angenommen haben. Es fällt der Reibungscoefficient k ganz aus. Die Gesammtarbeit ist immer dieselbe, sie wird mit kleinen Kräften auf einer grössern Strecke und natürlich auch in längerer Zeit geleistet, wenn die Reibung gering ist. Bei grosser Reibung wird sie mit grossen Kräften auf kurzer Strecke und in kurzer Zeit geliefert.

9.

Breuer hat mit Recht gegen die Goltz'sche Annahme, nach welcher die Ampullen je nach der Höhe der darüber stehenden Flüssigkeitssäule mehr oder weniger angespannt werden, hervorgehoben, dass die häutigen Bogengänge mit Flüssigkeit gefüllt und in einer Flüssigkeit von nahe gleichem specifischen Gewicht eingetaucht sind. Der Druck auf die Innen- und Aussenfläche jedes Wandelementes des häutigen Bogenganges wird immer gleich sein. Es ist aber noch Eins zu beachten. So gut die Perilymphe nach abwärts zieht, etwa gegen das runde Fenster, kann es auch noch die Endolymphe thun und eine Modification der Goltz'schen Ansicht wäre noch immer zulässig. Ich bin nämlich nicht mit Breuer einverstanden, wenn er sagt: »denn in geschlossenen Röhren kleiner Dimensionen, wo nirgend Luft zutreten kann, um den durch Senkung des Wassers nach den tiefsten Stellen entstehenden leeren Raum anzufüllen, drückt das Wasser gar nicht nach abwärts«. Auch in vollständig geschlossenen, vollständig von Flüssigkeit erfüllten Räumen, muss die Flüssigkeit abwärts drücken und der Druck von oben nach unten zunehmen. Dies beweist ja augenscheinlich der Auftrieb, den kleine specifisch leichtere Körperchen in einer solchen Flüssigkeitsmasse erfahren. Solche Theilchen steigen ja in der Flüssigkeit auf. Ein druckempfindliches Körperchen an der Wand oder im Innern einer solchen Höhle kann immerhin jede Bewegung und jede Aenderung der Stellung als Druckänderung empfinden. Ich stelle darum nicht in Abrede, dass die Otolithen, vermöge des Unterschieds im specifischen Gewicht gegen die umgebende Flüssigkeit, vorzüglich geeignet scheinen, die angeführten Umstände anzuzeigen.

10.

Die Empfindung der Drehung oder der Progressivbewegung lässt sich psychologisch auflösen in eine Folge von Lagenempfindungen. Man kann nun fragen, wieso eine einfache Erregung eines Sinnesorgans eine ganze Reihe von Empfindungen auslösen kann. Ein Bild dafür wären die Reihen, welche im Gedächtniss ablaufen, wenn an einem Glied der Kette gerührt wird oder die complicirteren Reflexvorgänge. Es ist übrigens auch möglich, dass der Empfindung der Geschwindigkeit ein Vorgang eigener Art zu Grunde liegt.

Noch eine eigenthümliche Erscheinung will ich erwähnen, welche vielleicht nicht unwichtig ist. Ich habe derselben schon in meiner zweiten Mittheilung gedacht und sehe jetzt, dass auch Brown sie bespricht. Es hat sich bei den beschriebenen Versuchen wiederholt gezeigt, dass ein Ekelgefühl sich hauptsächlich dann einstellte, wenn es schwer war, die Bewegungsempfindungen mit den optischen Eindrücken in Einklang zu bringen. Es sah so aus, als ob ein Theil des vom Labyrinth ausgehenden Reizes gezwungen worden wäre, die optischen Bahnen, die ihm durch einen andern Reiz verschlossen waren, zu verlassen und ganz andere Bahnen einzuschlagen.

Vor Jahren schon, bei Gelegenheit optischer Versuche, bin ich zu einer ähnlichen, allerdings noch sehr unvollkommenen Vorstellung gedrängt worden. Es schien mir nämlich, als ob vermöge der Unvereinbarkeit beider Netzhautbilder, ein Theil des optischen Reizes in andere Bahnen abfliessen würde, welchen wir dann als ein eigenes Merkmal des Gesehenen betrachten lernen und den wir mit Hering Tiefenempfindung nennen wollen. Auch beim Versuch, Stereoscopbilder mit starken Differenzen zu combiniren, habe ich wiederholt ein Ekelgefühl beobachtet.

11.

Bei der Lectüre der Studien von Hasse drängt sich die Ansicht auf, dass das Gehörorgan sich aus einem Tastorgan durch Adaptiren an periodische Reize entwickelt hat. Die Beziehung des Gehörorgans zur Bewegung kann dann nicht überraschen. In der That treten die Bogengänge schon viel tiefer in der Thierreihe auf, als die Schnecke. Möglich, dass, wie Breuer auch vermuthet, die sogenannten Gehörorgane der niedersten Thiere nichts wie Organe der Bewegungsempfindung sind. Diese Beziehung des Gehörorgans zur Bewegung ist dann wohl ein Erbstück aus jener Zeit, in welcher Ortsbewegung, Greifen und Schlingen noch Eins war. Die leichte und unmittelbare Bewegungsauslösung durch Geräusch (bei Schreck) gehört auch hieher.

Die Function des Labyrinthes als Gleichgewichtsorgan wird noch gestützt durch die morphologischen Verhältnisse. Die Schwimmblase der Fische, welche doch entschieden ein Gleichgewichtsorgan ist,

wirkt direct durch die sogenannten Gehörknöchelchen auf den Labyrinthinhalt. Selbstverständlich können solche Analogieen, unglücklich angewandt, auch täuschen. Ich habe z. B. vor Jahren den tensor tympani als einen Accommodationsmuskel aufgefasst und mich erst später durch Versuche überzeugt, dass er diese Function nicht hat*). Geht man von dem Ohr der höhern Wirbelthiere aus und kommt man auf das Ohr der Fische, so wird man geneigt sein, die Schwimmblase für eine Trommelhöhle zu halten und ihr eine akustische Function zuzuschreiben. Der umgekehrte Gang hätte dazu führen können, zu erkennen, dass die Muskel der Trommelhöhle keine akustische Function haben, sondern dass sie etwa die Lüftung der Trommelhöhle zu besorgen haben, was mir jetzt richtiger scheint. Wenn diese Analogieen auch nicht beweisend sind, so mag ihre Beachtung doch immer nützlich erscheinen.

Schluss.

Indem wir nun die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung zusammenfassen, gelangen wir zu folgenden Sätzen:

1. Es gibt besondere Bewegungsempfindungen der Progressivbewegung und Drehung des Körpers und wahrscheinlich auch besondere Empfindungen der Lage.
2. Die Progressiv- und Winkelbeschleunigung wirkt als Reiz dieser Empfindungen.
3. Diese Empfindungen lassen sich aber vorstellen als Empfindungen einer erlangten Progressiv- oder Winkelgeschwindigkeit.
4. Die Empfindungen dauern allmälig an Intensität abnehmend fort, wenn der Reiz erlischt.
5. Sie erschöpfen sich auch bei Fortdauer des Reizes.
6. Ein negatives Nachbild tritt nicht auf.
7. Je zwei dieser Empfindungen stehn im Gegensatz

---

*) Mach, zur Theorie d. Gehörorgans. Sitzgsber. d. Wiener Akademie 1863. — Neu aufgelegt Prag, Calve 1872. — E. Mach u. J. Kessel, über die Accommodation d. Ohres Sitzgsber. d. Wien. Akademie. Bd 66.

des Positiven und Negativen, so dass die Erregung der einen die andere noch vorhandene aufhebt.

8. Die Bewegungsempfindungen lassen sich nicht erklären durch die Wirkung der sensiblen Elemente der Knochen und des Bindegewebes, nicht durch die Wirkung der Haut, der Muskel, des Blutes oder des Hirns, wiewohl ein Mitwirken dieser Factoren bei Erkenntniss der Locomotion nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.
9. Das Organ der Bewegungsempfindungen hat seinen Sitz nachweisbar im Kopfe.
10. Die Annahme, dass das Hirn dies Organ sei, lässt sich nicht vollständig ausschliessen, bietet aber sehr grosse Schwierigkeiten in der Erklärung des Details der Erscheinungen.
11. Die Annahme, dass ein Theil des Labyrinthes Organ der Bewegungsempfindung sei, namentlich dass die sechs Ampullen der Bogengänge den sechs paarweise entgegengesetzten Grundempfindungen der Drehung entsprechen, erklärt alle hier beschriebenen und auch die Flourens'schen Versuche bis ins Detail.

Wie man sieht, bleiben die Sätze 1—10 bestehn, auch wenn die in 11 ausgesprochene Hypothese fällt, da sie sich keineswegs auf letztere stützen.

Zum Nachweise der Hypothese 11 wäre es wünschenswerth, wenn die schon in meiner ersten Mittheilung vorgeschlagenen Versuche, mechanisch dem Bogengang ein Drehungsmoment zu ertheilen oder eine einzelne Ampulle electrisch zu reizen, tadellos ausgeführt werden könnten. Breuer hat solche Versuche schon vor Publication meiner Arbeit ausgeführt. Er hat sie also ebenfalls als wichtig erkannt. Leider sind dieselben so schwierig auszuführen, dass Breuer selbst die Beweiskraft der bisher von ihm gemachten Beobachtungen nicht anerkennt. Auch ist noch zu bemerken, dass bei electrischen Reizungen beide Electroden auf die eine Ampulle gesetzt werden müssen, wenn nicht der Einwurf, dass Hirnaffectionen im Spiele seien, ein grosses Gewicht haben soll. Herstellung

der Flourens'schen Phänomene mit Vermeidung der Vivisection ist den Böttcher'schen Ansichten gegenüber von besonderm Werth. Auch die electromagnetische Erregung des Labyrinthes, wie ich sie in meiner ersten Mittheilung angedeutet habe, scheint mir nicht unmöglich.

Ein wichtiger Versuch endlich würde darin bestehn, Thiere mit durchschnittenem Acusticus in Rotation zu versetzen. Diese sollten keinen Drehschwindel bekommen. Goltz* hat den Verlust des Gleichgewichtssinnes an solchen Thieren schon beobachtet. Schade, dass nicht auch Drehversuche schon angestellt worden sind. Auch Breuer hat an einer Taube mit vollständig entfernten Bogengängen bei Drehung in der Hand die Schwindelerscheinungen vermisst. Solche Versuche muss ich Andern überlassen, da mir zur Ausführung von Vivisectionen die Kenntnisse fehlen und die Erwerbung derselben mit einem unverhältnissmässigen Aufwande an Zeit verbunden wäre.

Nachtrag.

Während des Drucks dieser Schrift habe ich eine beiläufige Bestimmung der Empfindlichkeit für die Winkelbeschleunigung versucht. Man denke sich ein umgekehrtes *T* (⊥), welches an dem verticalen Stiele bifilar aufgehängt ist, während der Beobachter auf den horizontalen Armen des *T* sitzend den Stiel umklammert. Die horizontalen Arme sind bedeutend verlängert und zur Aufnahme von Gewichten mit Haken versehn. Durch Hinzulegen von Gewichten vermehrt man das Trägheitsmoment des Apparates und durch Annäherung der beiden Aufhängepunkte vermindert man das Torsionsmoment. Mit Hilfe beider Operationen kann also die Schwingungsdauer des Apparates beliebig vergrössert werden.

Der mit geschlossenen Augen auf dem *T* sitzende Beobachter führt nun auf einen blossen Anstoss hin pendelförmige Torsionsschwingungen aus, für welche die S. 31 aufgestellten Formeln gel-

* Beiträge zur Lehre von den Functionen der Nervencentren des Frosches. Berlin 1869.

ten, wenn in denselben x die Winkelexcursion aus der Gleichgewichtslage, a das Maximum dieser Excursion und T die Dauer einer ganzen Schwingung vorstellt. Die Schwingungen nehmen allmälig an Excursion ab und der Beobachter gibt an, wann er dieselben nicht mehr fühlt, während ein Gehilfe die Schwingungsdauer zählt und die Excursionen abliest, welche ein am Arme des T befestigter Zeiger über einem Gradbogen beschreibt.

Für mich wurden die Torsionsschwingungen unmerklich, wenn $a = 10^0$ und $T = 14$ Secunden war. Herr Dr. Dvořak fühlte die Schwingungen nicht mehr, wenn $a = 13^0$ und $T = 16$ Secunden war. Demnach liegt der Schwellenwerth der Winkelbeschleunigung zwischen 2 und 3^0.

Auch bei den leisesten Torsionsschwingungen sehe ich, so lange dieselben überhaupt merklich sind, alle hellen Fleckchen und Wölkchen des dunklen Gesichtsfeldes die Bewegung mitmachen.

Druckfehler.

S. 64 Z. 13 von unten ist zu lesen »aber« statt »also«.

Inhalt.

Druck von Breitkopf und Härtel in Leipzig